

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

ANALYSE PHYSIQUE DES SAUCES DE COUCHAGE A BASE DE
MICRONANOCCELLULOSE FIBRILLÉE

THÈSE PRÉSENTÉE
COMME EXIGENCE PARTIELLE DU

DOCTORAT EN SCIENCES ET GÉNIE
DES MATÉRIAUX LIGNOCELLULOSIQUES

PAR
ABDELAADIM TIBOUDA

AOÛT 2020

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES
SCIENCES ET GÉNIE DES MATÉRIAUX LIGNOCELLULOSIQUE (PH.D.)

Direction de recherche :

Patrice J. Mangin	Directeur de recherche
-------------------	------------------------

Éric Loranger	Codirecteur de recherche
---------------	--------------------------

Jury d'évaluation

Jean-Francis Bloch	Évaluateur externe
--------------------	--------------------

Martin Dubé	Évaluateur externe
-------------	--------------------

Bruno Chabot	Président de jury
--------------	-------------------

Thèse soutenue le 30 04 2020

Avant-propos

Le couchage rideau est un procédé sans contact qui permet de déposer un liquide sur une feuille de papier et dont le point clé est la stabilité du rideau. Néanmoins, il existe aujourd'hui un écart important entre la stabilité théorique du rideau et les observations. J'ai analysé l'effet des propriétés rhéologiques et physiques sur la stabilité du rideau, j'ai également analysé l'écoulement interne dans l'HydraSizer™ par CFD (Computational Fluid Dynamics) pour les différentes suspensions L-MNFC (Micro-Nano-Fibrillated-Cellulose in low fibrillated state). L'écoulement externe a été aussi analysé. En outre, des essais en ligne sur l'HydraSizer™ sont réalisés pour comparer les observations des analyses et tester l'efficacité de la L-MNFC et de l'HydraSizer™. Les résultats des analyses et des essais permettent de déterminer une fenêtre opérationnelle et améliorer la qualité du couchage.

Remerciements

Je souhaite exprimer ma sincère gratitude au professeur Patrice J. Mangin, qui m'a offert l'opportunité d'étudier à l'université du Québec à Trois-Rivières et de réaliser une thèse de doctorat. Sous la direction du professeur Patrice J. Mangin, j'ai beaucoup appris sur le sujet, j'ai développé mon savoir-faire ainsi que mon savoir-être. J'aimerais aussi remercier le professeur Éric Loranger, co-directeur du projet, pour ses conseils précieux et pour m'avoir donné les conditions qui m'ont permis d'aboutir aux objectifs et de conclure.

Je remercie également avec gratitude Benoit Delcroix et Fabrice Roussière, postdoctorants dans l'équipe de recherche du professeur Patrice Mangin. En tant que chercheurs les plus proches, Benoit Delcroix et Fabrice Roussière m'ont toujours fourni des conseils patients et des bonnes suggestions et idées sans fin. Pendant les années de mes études, nous avons passé beaucoup de temps ensemble à développer des méthodes de recherche et à analyser des résultats souvent pas trop évidents et attendus. En effet, j'ai beaucoup amélioré mes connaissances et acquis. Ils m'ont appris comment gérer un travail de thèse tout en profitant de leurs expériences et surtout ils ont été un appui considérable pour moi dans les moments difficiles où les choses ne marchent pas comme nous les avons tracées. Leur extrême prudence, leur patience et leur sens des responsabilités sont des qualités qui ont contribué à la réalisation de ce travail.

J'aimerais aussi remercier Mr. Daniel Matte, qui travaille actuellement pour Produits Forestiers Résolu (pendant ma thèse, à la fois avec le Centre international de couchage et l'UQTR), qui a également contribué au projet dans la partie des essais hors ligne. Au début de mon projet, il m'a présenté l'instrument de couchage rideau l'HydraSizerTM, en m'expliquant en détail sa structure et son fonctionnement. Ces connaissances de base ainsi que son expertise en ingénierie du couchage rideau ont permis de résoudre pas mal de problématiques liées au fonctionnement de l'HydraSizerTM.

Je suis reconnaissant au Dr. Martin Dubé pour son soutien et son assistance, et plus précisément pour sa contribution à améliorer efficacement les méthodes de mesure rhéologique et

tensiométrique. Il était également très inspirant dans la manière d'expliquer les résultats de la recherche et aussi il était toujours disponible pour aider et discuter.

Mes remerciements vont également à l'égard du personnel de l'IRH pour leur accueil et soutien pour réaliser la partie simulation du projet. Je remercie vivement Mr. Benjamin Angers et Ahmed Hourri, sans eux la partie simulation ne serait pas accomplie. Leur patience et leur compréhension de la difficulté du travail ont permis de réussir le travail et aboutir à quelques importants résultats difficilement envisagés par une approche expérimentale.

Je remercie également toute l'équipe Innofibre pour leur contribution remarquable dans le projet. Mon implication directe avec l'équipe dirigée par Jean Paradis dans les essais sur la machine à papier était une opportunité maîtriser mes connaissances liées au procédé couchage rideau. Je tiens aussi à adresser mes remerciements les plus sincères à France Lemay, Isabelle Boulan, Céline Leduc et Agnès Lejeune pour leur gentillesse, leur écoute et leur implication durant mon séjour.

Un grand merci à mes chers amis du Centre de recherche sur les matériaux lignocellulosiques (CRML) (actuellement I2E3 - Institut d'Innovations en Écomatériaux, Écoproduits et Écoénergies) : Mohamed Ali Charfeddine, Clément Villemont, Ichrak Lakhdhar et Xiaoman Xu. Leur aide et leur amitié ont fait de mon séjour au I2E3 une expérience agréable. À de nombreux autres amis, qui m'ont aidé au fil des années et qui ont partagé les difficultés et les joies avec moi, je vous remercie.

À la fin, je devrais dédier ce sacrifice à mes parents. Leur absence était trop dure et reste toujours difficile. Chers parents, je souhaite exprimer ma profonde gratitude pour votre sacrifice inconditionnel, votre soutien indéfectible et votre amour. Enfin, je voudrais remercier nos partenaires Omya International AG, la société GL&V et le réseau ArboraNano, ainsi que le CRSNG pour leur soutien financier, et plus particulièrement Omya International AG pour leur contribution à la compréhension du comportement rhéologique des suspensions MNFC.

Résumé

En tant que matériau renouvelable, la Micro-Nanocellulose Fibrillée (cellulose fibrillée avec des diamètres de fibrilles de quelques nanomètres ou micromètres et des longueurs micrométriques, simplement appelée MNFC) possède des propriétés intrinsèques remarquables qui la rendent propice pour de nombreuses applications. Grâce à d'excellentes propriétés mécaniques et barrières, la L-MNFC permet de valoriser de nombreux papiers tels que les produits à base de pâte thermomécanique (TMP). De précédentes études ont démontré les gains en termes de propriétés mécaniques lorsque les MNFC sont ajoutés en masse, lors de la formation de la feuille, et les gains en termes de propriétés barrières lorsque les MNFC sont ajoutés en surface, par couchage du papier. La présente thèse s'intéresse à l'ajout de MNFC dans la partie humide lors de la fabrication du papier, non pas dans la masse mais en tant que couche de structure via un procédé de couchage rideau. Étant donné que la dispersion de MNFC et le contrôle de sa tension de surface en suspension est essentielle pour atteindre les performances liées à sa structure micro-nano, le premier objectif de ce travail est d'abord de comprendre l'effet du dispersant et du tensioactif (additifs) sur la MNFC en suspension dans l'eau et aussi. Le second objectif est d'analyser l'effet des additifs (en fonction de leurs propriétés rhéologiques et physiques) sur la stabilité du rideau qui est réalisé par l'Hydra-Sizer™, un appareil développé par GL&V, permettant d'effectuer un couchage rideau en partie humide d'une machine à papier. En outre, et en relation avec la stabilité du rideau, la compréhension de l'écoulement interne et externe des suspensions MNFC est un élément clé pouvant aider à améliorer les connaissances sur le couchage rideau de la MNFC en utilisant l'HydraSizer™. De ce fait, un autre objectif est d'analyser l'écoulement interne par CFD et l'écoulement externe par une étude analytique basée sur le calcul des paramètres propres à la zone de l'écoulement externe. En parallèle, nous proposons une étude expérimentale visant l'évaluation de la rentabilité de l'HydraSizer™ sur la machine à papier. Nous désignons par le terme "rentabilité", la capacité de l'HydraSizer™ à fournir un écoulement uniforme et stable (de la suspension MNFC) dans des conditions similaires à celles de l'industrie du papier. Une validation des résultats de l'analyse est présentée.

La MNFC utilisée est la L-MNFC (micro-nano-cellulose-fibrillée avec un faible degré de fibrillation, L pour « Low »). La suspension L-MNFC est produite par le broyage de pâte d'eucalyptus blanchie en présence de particules de carbonate de calcium broyées. L'utilisation de la pâte d'eucalyptus est dû à sa croissance rapide et ses propriétés correctes pour un bois dur. Le produit final contient 80% de fibrilles de cellulose et 20% de CaCO_3 en masse. Les échantillons préparés sont : L-MNFC 0,5 wt% (poids en fibrilles) + CMC (Carboxymethyl Cellulose) 0; 2; 4; et 6% en masse, la concentration de CMC étant basée sur la quantité de L-MNFC, L-MNFC 0.5 wt% + NIAPROOF 0.01; 0.03; 0.05%, L-MNFC0.5wt%+ CMC 2+ NIAPROOF 0.01 et L-MNFC0.5wt%+ CMC 6+ NIAPROOF 0.05. La revue de littérature a montré que le poly-électrolyte Carboxy Méthyl Cellulose (CMC), un composé anionique, contribue à la dispersion de fibres cellulosiques au niveau micrométrique et le NIAPROOF comme un bon agent tensioactif pour assurer la stabilité des saucés de couchage. Pour optimiser la dispersion et la stabilité de la L-MNFC, les influences de la CMC et du tensioactif sur la L-MNFC ont donc été étudiées. Afin de quantifier l'action de la CMC et du tensioactif, deux types d'essais ont été réalisés : l'étude rhéologique et la tension de surface des micro-nano fibrilles de cellulose. La première indique le comportement dynamique entre les fibrilles (agglomérations, fluide non newtonien...) alors que la deuxième informe sur la variation de la tension de surface des suspensions L-MNFC. L'adsorption de tensioactifs à l'interface liquide a pour principal effet la réduction de la tension de surface. Cependant, ce n'est pas la seule propriété apportée par les tensioactifs : leur présence peut conduire à des gradients de tension qui confèrent à l'interface des propriétés de résistance aux déformations, autrement dit, le tensioactif peut affecter la viscosité des suspensions L-MNFC. Ensuite, nous exploitons les résultats de ces essais pour analyser l'effet des additifs sur la stabilité du rideau. Cette analyse est basée sur le fait de trouver une corrélation entre les propriétés physiques et le nombre de Reynolds caractérisant l'écoulement. L'analyse CFD de l'écoulement interne se fait aussi en utilisant les propriétés mesurées des suspensions L-MNFC.

Pour la L-MNFC, les essais rhéologiques montrent que l'ajout de CMC diminue la viscosité de la suspension et, à hauts cisaillements, efface quelques perturbations qui sont probablement causées par la formation de floccs. Ces comportements indiquent que la formations des floccs dans la suspension de L-MNFC diminue à mesure que la

concentration de CMC augmente. L'étude de la tension de surface dynamique a révélé que la CMC n'affecte pas significativement la tension de surface de la suspension L-MNFC à l'opposé du NIAPROOF qui diminue largement la tension de surface mais sans effet considérable sur la viscosité. De ce fait, nous avons pensé que l'utilisation des deux modificateurs à la fois peut donner des bons résultats pour le couchage rideau, une optimisation de la CMC et du tensioactif ainsi que les conditions de fonctionnement est nécessaire pour assurer un couchage réussi.

Nous avons mesuré expérimentalement le débit minimal pour la formation du rideau pour les suspensions L-MNFC avec CMC (suspensions M-CMC) et avons constaté que le débit minimal augmentait légèrement avec la diminution de la viscosité et avec une légère augmentation de la tension de surface et de la densité des suspensions M-CMC. Cela veut dire que la stabilité du rideau des suspensions M-CMC diminue légèrement avec la diminution de la viscosité (diminution de la résistance à la rupture) et l'augmentation de la tension de surface (augmentation de la rupture du rideau). De plus, l'effet du tensioactif et l'effet combiné (CMC et tensioactif) sur le débit minimal a été étudié. La stabilité augmente avec l'augmentation de la teneur en tensioactif (pour les suspensions M-NIA : Micronanocellulose fibrillé - NIAPROOF) et avec l'augmentation de CMC et de NIAPROOF (pour les suspensions M-CMC-NIA : Micronanocellulose fibrillée – Carboxymethyl cellulose - NIAPROOF). L'origine de cette variation de stabilité peut se faire comprendre par l'analyse CFD de l'écoulement L-MNFC en amont (écoulement dans la cavité d'HydraSizerTM).

Nous avons simulé l'écoulement des suspensions L-MNFC et étudié l'impact des propriétés rhéologiques et physiques (viscosité et tension de surface) et des conditions opératoires (débit) dans la cavité de l'HydraSizerTM. Nous avons montré que pour les suspensions M-CMC, la diminution de la viscosité et l'augmentation légère de la tension de surface (augmentation de la teneur en CMC) augmente la taille de la perturbation (taille du tourbillon). D'un autre côté, et pour les suspensions M-NIA, la taille de la perturbation observée au niveau de la suspension L-MNFC0.5% diminue avec l'augmentation de la teneur en NIAPROOF (diminution de la tension de surface et diminution légère de la viscosité). Enfin, l'effet combiné de la CMC et du tensioactif conduit à la diminution du

tourbillon et à sa disparition pour 6% en CMC et 0.05% du NIAPROOF. L'effet du débit est bien clair pour les suspensions M-CMC : l'augmentation du débit augmente clairement la taille du tourbillon et donc la perturbation de l'écoulement. Pour les suspensions M-NIA et les suspensions M-CMC-NIA le débit n'a pas d'effet significatif sur l'écoulement : ceci peut confirmer les résultats de l'analyse de la stabilité.

Pour l'analyse de l'écoulement externe, nous avons montré que l'épaisseur du rideau L-MNFC dans la zone d'impact augmente en fonction du débit de fonctionnement. Nous avons constaté également que l'épaisseur du rideau augmente en fonction des additifs. Les suspensions M-CMC-NIA offre l'épaisseur du rideau le plus élevé. La CMC offre une épaisseur plus que le tensioactif. Nous avons conclu que la CMC et le tensioactif offre un écoulement interne uniforme, une stabilité du rideau et une épaisseur élevée au niveau de la zone d'impact. De ce fait, nous avons montré l'existence d'un lien important entre le rideau dans la zone d'impact, la stabilité du rideau l'uniformité de l'écoulement interne et les propriétés des suspensions L-MNFC. Une meilleure optimisation des suspensions L-MNFC peut être proposée à travers l'utilisation des deux modificateurs à la fois (CMC et tensioactif).

Afin de réaliser l'application de la L-MNFC en tant qu'agent de couchage, la capacité d'écoulement (débit) des suspensions L-MNFC dans le processus de couchage rideau a été explorée. Tout d'abord, les caractéristiques de fonctionnement de l'Hydra-Sizer™ ont été évaluées en utilisant de l'eau et la CMC comme modificateur de rhéologie dans des essais hors machine à papier (hors ligne). Les essais montrent que la stabilité du rideau le long de l'Hydra-Sizer™ peut être améliorée en ajustant avec précision l'écartement des lèvres de l'appareil. Le débit global en masse diminue légèrement mais reste constant pour les différentes viscosités. Après l'ajustement des lèvres, les suspensions L-MNFC avec et sans CMC ont ensuite été utilisées pour vérifier la stabilité du rideau dans l'Hydra-Sizer™. Les deux suspensions ont montré la formation d'un rideau plus ou moins stable sans différence notable entre elles. L'application de la MNFC dans le couchage rideau effectuée par l'Hydra-Sizer™ est donc réalisable avec quelques perturbations et les essais en ligne permettront de valider le procédé en condition dynamique. D'un autre côté, les essais en ligne ont montré que, l'application de l'HydraSizer™ s'est bien déroulée après

le top-former. Les deux débits massiques peuvent être utilisés, mais une inclinaison est préférable à haute vitesse pour éviter le reflux. Les ruptures du rideau apparaissent le long de l'ouverture de la buse. Les bouchons de fibres apparaissant de manière aléatoire peuvent être évités en augmentant l'ouverture de l'espace.

Ce projet de thèse a permis d'expliquer l'effet et l'importance de la CMC et du tensioactif sur la dispersion des fibrilles et sur la stabilité du rideau et l'uniformité de l'écoulement. Des études quantitatives et analytiques ont validé la dispersion et l'homogénéisation des suspensions L-MNFC par la CMC et le tensioactif. L'étude remet en question le design de l'HydraSizer™, des simulations CFD peuvent conduire à trouver une géométrie optimale afin d'avoir une uniformité idéale de la L-MNFC.

Mots Clés

Micro-nanocellulose fibrillée, CMC, Tensioactif, HydraSizer™, stabilité, Uniformité, CFD, Viscosité, Tension de surface, Densité, Débit.

Table des Matières

Avant-propos.....	ii
Remerciements.....	iii
Résumé.....	v
Table des Matières	x
Liste des Figures	xiv
Liste des Tableaux.....	xviii
Liste des Équations	xix
Liste des Abréviations.....	xxii
Chapitre 1 - Introduction.....	1
Chapitre 2 - Revue de littérature	4
2.1 Fibrilles de cellulose : Méthodes de préparation et prétraitement	4
2.1.1 Homogénéisateur	4
2.1.2 Broyeur	4
2.1.3 Prétraitement alcalin	5
2.1.4 Prétraitement enzymatique	5
2.1.5 Prétraitement Oxydant	5
2.2 Propriétés de la MNFC	6
2.2.1 Propriétés mécaniques	6
2.2.2 Propriétés barrières	6
2.2.3 Propriétés rhéologiques	6
2.3 Dispersion de la MNFC	7
2.3.1 Agent dispersant: la carboxyméthylcellulose (CMC).....	7
2.3.2 Effet de dispersion par CMC sur la fibre.....	7
2.3.3 Effet de dispersion par CMC sur la rhéologie de la MNFC	8

2.4	Couchage rideau	9
2.4.1	Contexte et technologies.....	9
2.4.2	Physique du couchage rideau.....	10
2.4.3	Condition de stabilité du rideau	13
2.5	Paramètres du couchage rideau.....	16
2.5.1	Hauteur du rideau	16
2.5.2	Tension de surface et âge de surface	17
2.5.3	Rhéologie du couchage.....	18
2.5.4	Débit (poids de couche).....	19
2.6	Écoulement interne	19
2.6.1	Équations d'écoulement interne	20
2.6.2	Analyse de l'écoulement dans la cavité.....	21
2.7	Écoulement externe du rideau.....	23
2.7.1	Modèle de Dyson.....	23
2.7.2	Modèle de Brown	24
2.8	Conclusion	25
	Chapitre 3 - Matériels et méthodes	27
3.1	Matériels	27
3.1.1	Micro nanocellulose fibrillée (MNFC).....	27
3.1.2	Dispersant / modificateur rhéologique (CMC).....	28
3.1.3	Carbonate de calcium (CaCO_3)	28
3.1.4	Tensioactif (NIAPROOF).....	28
3.1.5	Rhéomètre.....	29
3.1.6	Viscosimètre	29
3.1.7	Tensiomètres.....	30
3.1.8	EGT.....	31
3.1.9	Logiciel CFD	32
3.1.10	HydraSizer™	33
3.2	Méthodes.....	34
3.2.1	Composition des suspensions L-MNFC	34
3.2.2	Caractérisation des suspensions L-MNFC.....	35

3.2.3	Effet des propriétés physiques mesurées sur la stabilité du rideau L-MNFC	39
3.2.4	Écoulement interne : Maillage de l'HydraSizer™ et simulation	40
3.2.5	Modélisation analytique de l'écoulement externe des suspensions L-MNFC	49
3.2.6	Essais HydraSizer™ (Essais hors ligne et en ligne).....	53
Chapitre 4 - Résultats et discussions.....		58
4.1	Caractérisations des suspensions L-MNFC	59
4.1.1	Rhéologie.....	59
4.1.2	Tensiométrie	65
4.1.3	Teneur en bulles d'air.....	68
4.1.4	« Modèle fluide » des suspensions L-MNFC	69
4.2	Effet des propriétés physiques des suspensions L-MNFC sur la stabilité du rideau.....	70
4.2.1	Débit minimal de la formation du rideau pour les suspensions L-MNFC avec CMC	71
4.2.2	Débit minimal de la formation du rideau pour les suspensions L-MNFC avec tensioactif	77
4.2.3	Débit minimal de la formation du rideau pour les suspensions M-CMC-NIA (L-MNFC avec CMC et tensioactif)	79
4.2.4	Effet du guide de bord sur la stabilité du rideau pour l'HydraSizer™.....	80
4.2.5	Conclusions	81
4.3	Analyse numérique de l'écoulement interne	82
4.3.1	Conception et maillage de l'HydraSizer™	82
4.3.2	Simulation CFD de l'écoulement interne	84
4.4	Analyse de l'écoulement externe et paramètres extensionnelles de la L-MNFC	93
4.5	Capacité de la (L-MNFC+CMC) dans les essais hors-ligne d'Hydra-Sizer™	97
4.5.1	Efficacité de l'Hydra-Sizer™	98
4.5.2	Performance de la MNFC dans les essais hors ligne d'Hydra-Sizer™	100

4.5.3	Discussion sur la performance de la MNFC dans l'Hydra-Sizer TM	103
4.6	Résultats des essais en ligne d'HydraSizer TM	104
4.6.1	Performance de la première série des essais	104
4.6.2	Performance de la deuxième série des essais	105
Chapitre 5 - Conclusion		109
Bibliographie.....		114
Annexes.....		118

Liste des Figures

Figure 2.1 Gel de MFC [4].....	4
Figure 2.2 Effets de la CMC sur les dispersions de MCC colloïdal [19].....	8
Figure 2.3 Viscosité relative des suspensions de polymère et de MNFC [20]	8
Figure 2.4 coucheuse rideau à buse.....	10
Figure 2.5 Les trois zones du procédé couchage rideau [27].....	11
Figure 2.6 Influence de la vitesse de la bande (U) sur le développement du poids de la couche [27].....	13
Figure 2.7 Fenêtre opérationnelle proposée pour coucheuse rideau [27]	13
Figure 2.8 Forces inertielles et de tension de surface dans la formation du rideau [27]..	14
Figure 2.9 Fenêtre opérationnelle pour couchage rideau [23]	15
Figure 2.10 Tension de surface et âge de la surface	17
Figure 2.11 Déformation d'un fluide a) en cisaillement simple et b) en élongation	18
Figure 2.12 Exemple d'une coucheuse rideau pilote et formes des cavités[37]	19
Figure 2.13 Deux Conceptions de la cavité : en forme de T et en forme d'arc	20
Figure 2.14 Effet du nombre de Reynolds et comparaison des résultats de la.....	22
Figure 2.15 Les coordonnées du rideau [45].....	24
Figure 3.1 a) Rhéomètre Rheologica Stresstech; b) P 20 et P 40; c) Principe de fonctionnement.....	29
Figure 3.2 Viscosimètre (VC), A&D, VC-10	30
Figure 3.3 Tensiomètre KRUSS	30
Figure 3.4 Tensiomètre dynamique.....	31
Figure 3.5 Testeur de gaz entraîné (EGT).....	32
Figure 3.6 HydraSizer™ au I2E3	33
Figure 3.7 a) Partie fixe de l'HydraSizer™ ; b) Partie active de l'HydraSizer™	33
Figure 3.8 Principe de la méthode de Wilhelmy [48]	37
Figure 3.9 Méthode de pression maximale de bulle	37
Figure 3.10 Principe fondamental d'un modèle CFD	40
Figure 3.11 Schéma de l'HydraSizer™	42
Figure 3.12 Détails pour CutCell Meshing	43
Figure 3.13 Forme de la cavité pour CFD	44
Figure 3.14 Paramètres du rideau.....	49

Figure 3.15 a) Schéma de l'Hydra-Sizer TM pour les tests hors ligne ; b) Hydra-Sizer TM avec un réservoir de recirculation	54
Figure 3.16 Méthode de test de la stabilité et de mesure du débit massique d'Hydra-Sizer TM	55
Figure 3.17 Schéma de la table Fourdrinier de la machine à papier pilote d'Innofibre avec les trois positions d'HydraSizer TM (A, B et C)	56
Figure 4.1 Courbes viscosité-taux de cisaillement, contrainte de cisaillement-taux de cisaillement et module élastique des suspensions L-MNFC en présence de la CMC	61
Figure 4.2 Courbes viscosité-taux de cisaillement, contrainte de cisaillement-taux de cisaillement et module élastique des suspensions L-MNFC en présence du tensioactif	64
Figure 4.3 Courbes viscosité-taux de cisaillement a), contrainte de cisaillement-taux de cisaillement b) et module élastique c) des suspensions L-MNFC en présence de la CMC et du tensioactif	65
Figure 4.4 Effet de la CMC sur la tension de surface dynamique des suspensions L-MNFC	66
Figure 4.5 Effet du tensioactif sur la tension de surface des suspensions L-MNFC	67
Figure 4.6 Effet combiné de la CMC et du tensioactif sur la tension de surface des suspensions L-MNFC	68
Figure 4.7 Teneur en bulles d'air des suspensions L-MNFC avec CMC et tensioactif...	69
Figure 4.8 a) Viscosité et débit de formation du rideau pour les suspensions M-CMC b) Tension de surface et débit de formation du rideau des suspensions M-CMC	72
Figure 4.9 Effet de la tension de surface des suspensions M-CMC sur le débit minimal du rideau.....	73
Figure 4.10 Relation entre le nombre de propriétés physiques (Ka) et le nombre de Reynolds (Re) pour les suspensions L-MNFC avec CMC	75
Figure 4.11 Relation entre le débit minimal calculé et le débit minimal mesuré du rideau pour les suspensions L-MNFC avec la CMC (a- Q=50L/min; b- Q=70L/min).....	76
Figure 4.12 Effet de la teneur en tensioactif sur a) la viscosité, b) la tension de surface et sur le débit minimal du rideau (calculé) des suspensions L-MNFC	78
Figure 4.13 Effet combiné (tensioactif et CMC) sur a) la viscosité, b) la tension de surface et sur le débit minimal du rideau (calculé) des suspensions L-MNFC	80
Figure 4.14 Les modes idéaux du film tombant (a) gouttelettes (b) jets (c) rideau	81
Figure 4.15 Conception CAO avec SpaceClaim : a) vue en face de l'HydraSizer TM ; b) Cavité de l'HydraSizer TM (vue de droite); c) Fente de l'HS TM (vue de gauche)	83
Figure 4.16 Maillage en 3D (vue gauche).....	84
Figure 4.17 Convergence de l'équation de continuité et de conservation	85
Figure 4.18 Évolution des lignes de courant pour : a) cas d'écoulement stable ; b), c) et d) cas d'écoulement instable	86

Figure 4.19 Trajectoire de l'écoulement interne des suspensions M-CMC (L-MNFC avec CMC)	87
Figure 4.20 Trajectoire de l'écoulement interne des suspensions M-NIA (L-MNFC avec NIAPROOF)	88
Figure 4.21 Trajectoire de l'écoulement interne des suspensions M-CMC-NIA (L-MNFC avec NIAPROOF et CMC)	88
Figure 4.22 Effet du débit sur la formation du tourbillon pour un fluide en loi de puissance (suspension M-CMC6) avec $K=0.68\text{Pa.s}^n$ et un indice de loi de puissance $n=0.76$	89
Figure 4.23 Indice d'uniformité des suspensions M-CMC en fonction de N_v	92
Figure 4.24 Indice d'uniformité des suspensions M-NIA en fonction de N_v	92
Figure 4.25 Indice d'uniformité des suspensions M-CMC-NIA en fonction de N_v	92
Figure 4.26 Pression des suspensions M-CMC en fonction de N_v	92
Figure 4.27 Pression des suspensions M-NIA en fonction de N_v	92
Figure 4.28 Pression des suspensions M-CMC-nia en fonction de N_v	93
Figure 4.29 Épaisseur du rideau L-MNFC en fonction du débit pour différentes suspensions.....	94
Figure 4.30 Taux d'étirement du rideau en fonction du débit pour les suspensions L-MNFC	95
Figure 4.31 Étirement opérationnel en fonction de l'étirement total	96
Figure 4.32 Étirement opérationnel en fonction du taux d'étirement	97
Figure 4.33 Débit massique de l'eau avec différents taux de recirculation et ouverture de buse à différentes positions	99
Figure 4.34 Débit massique et viscosité de la CMC	100
Figure 4.35 Écoulement rideau pour la suspension L-MNFC 0.5% (à 50 L/min de débit (à gauche) et à 70 L/min de débit (à droite)).....	101
Figure 4.36 Débit massique de la suspension L-MNFC 0.5% à la sortie de l'Hydra-Sizer™	101
Figure 4.37 Écoulement rideau pour la suspension L-MNFC 0.5% + CMC 6% (à 50 L/min de débit (à gauche) et à 70 L/min de débit (à droite))	102
Figure 4.38 Débit massique de la suspension L-MNFC 0.5% + CMC 6% le long de la sortie de Hydra-Sizer™	103
Figure 4.39 Rideau 0.5% L-MNFC à 50 L/min (la flèche indique le sens de la machine à papier)	105
Figure 4.40 Rideau 0.5% L-MNFC à 70 L/min (la flèche indique le sens de la machine à papier)	105
Figure 4.41 Image de face du flux incliné.....	105
Figure 4.42 Image arrière du flux incliné.....	105

Figure 4.43 Rideau L-MNFC+CMC en position A à 50L/min.....	106
Figure 4.44 Rideau L-MNFC+ CMC en position A à 70L/min.....	106
Figure 4.45 HydraSizer™ en position B.....	106
Figure 4.46 Rideau 0.5 % L-MNFC en position B à 50L/min.....	107
Figure 4.47 Rideau 0.5 % L-MNFC en position B à 70L/min.....	107
Figure 4.48 Rideau L-MNFC+CMC en position B à 50L/min.....	107
Figure 4.49 Rideau L-MNFC+CMC en position B à 70L/min.....	107
Figure 4.50 L'HydraSizer™ en position C	108

Liste des Tableaux

Tableau 2.1 Entreprises qui ont récemment mis en place des coucheuses rideaux avec leurs principaux produits.....	9
Tableau 3.1 Caractéristiques de la MNFC	28
Tableau 3.2 Composition des suspensions L-MNFC.....	34
Tableau 3.3 Essais de suspensions MNFC dans l'Hydra-Sizer™ hors ligne	55
Tableau 3.4 Conception expérimentale des essais en ligne sur la machine à papier d'Innofibre.....	57
Tableau 4.1 Caractéristiques de l'Hydrasizer™	60
Tableau 4.2 Paramètres des modèles rhéologiques des suspensions L-MNFC utilisées dans les essais.....	70
Tableau 4.3 Propriétés physiques des suspensions L-MNFC	71
Tableau 4.4 Résumé des simulations pour les suspensions L-MNFC en loi de puissance dans la cavité de l'HydraSizer™	90
Tableau 4.5 Effet des paramètres physiques et rhéologiques sur l'uniformité de l'écoulement dans la cavité de l'HydraSizer™	91
Tableau 4.6 Essais de l'eau dans l'Hydra-Sizer™ hors ligne.....	98

Liste des Équations

$\rho V^2 H > 2\sigma$	Éq. 2.1	13
$W_e > 2$	Éq. 2.2	13
$V^2 = V_0^2 + 2gH$	Éq. 2.3	16
$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{dP}{dx} - \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} - \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} - \rho g \right)$	Éq. 2.4	20
$\frac{d\rho}{dt} + \rho \operatorname{div} \vec{V} = 0$	Éq. 2.5	20
$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$	Éq. 2.6	21
$F = p \sigma \cos(\theta)$	Éq. 3.1	36
$\sigma = \left(\frac{\Delta P - \rho g h}{2} \right) R$	Éq. 3.2	38
$\rho \int \left(\frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} \right) dA = \int \left(\rho g_x - \frac{dP}{dx} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) dA$	Éq. 3.3	46
$\frac{\rho}{A} \int \frac{\partial u}{\partial x} dA = \rho g_x - \frac{dP}{dx} - \frac{1}{A} \oint \tau_{xn} ds$	Éq. 3.4	46
$\oint \tau_{xn} dS = \bar{\tau} P_e$	Éq. 3.5	46
$\alpha = \frac{1}{A} \int \frac{u^2}{u} dA$	Éq. 3.6	46
$\frac{dP}{dx} = -\frac{\rho}{A} \frac{d(A \bar{u}^2 \alpha)}{dx} + \rho g_x - \frac{\bar{\tau} P_e}{A}$	Éq. 3.7	46
$\bar{\tau} = \frac{\bar{\eta} Q N_{ref} P_e}{8 A^2}$	Éq. 3.8	46
$\frac{dQ}{dx} = -q$	Éq. 3.9	47
$q = \frac{p H^3}{12 L \eta}$	Éq. 3.10 où $\bar{\gamma} = \frac{6q}{H^2}$	47
$\bar{\tau} = K a \bar{\gamma}^n$	Éq. 3.11	47

$$a = \frac{\eta_0}{\gamma_0^{n-1}} \quad \text{Éq. 3.12} \dots\dots\dots 47$$

$$\frac{dV}{dX} = -P^{1/n} \quad \text{Éq. 3.13} \dots\dots\dots 47$$

$$\frac{dP}{dX} = N_g - N_m V \frac{dV}{dX} - N_v V^n \quad \text{Éq. 3.14} \dots\dots\dots 47$$

$$UI = \left[1 - \frac{[(1 + 0,05n)n\alpha L]^{\frac{n+1}{n}}}{(1 + 0,05n)(n+1)} \right]^n \quad \text{Éq. 3.15} \dots\dots\dots 48$$

$$Q_0 = S_B * V_B \quad \text{Éq. 3.16} \dots\dots\dots 50$$

$$S_B = \frac{\Delta m}{K * \rho_{L-MNFC}} \quad \text{Éq. 3.17} \dots\dots\dots 50$$

$$V_0 = \frac{Q_0}{S_0} \quad \text{Éq. 3.18} \dots\dots\dots 50$$

$$V_{imp} = V_0 + \sqrt{2 * (g - a) * H} \quad \text{Éq. 3.19} \dots\dots\dots 50$$

$$V_{imp} = V_0 + \sqrt{2 * g * H} \quad \text{Éq. 3.20} \dots\dots\dots 50$$

$$Q_0 = V_0 * S_0 = V_h * S_h = V_{imp} * S_{imp} = V_B * S_B \quad \text{Éq. 3.21} \dots\dots\dots 50$$

$$S_{imp} = \frac{Q_0}{V_{imp}} \quad \text{Éq. 3.22} \dots\dots\dots 51$$

$$\chi_g = \frac{V_{imp}}{V_0} = \frac{S_0}{S_{imp}} \quad \text{Éq. 3.23} \dots\dots\dots 51$$

$$L = \frac{\sigma * t}{\eta} \quad \text{Éq. 3.24} \dots\dots\dots 52$$

$$t = \frac{S_B}{V_B} - \frac{S_{imp}}{V_{imp}} \quad \text{Éq. 3.25} \dots\dots\dots 52$$

$$\chi_0 = \frac{V_B}{V_{imp}} = \frac{S_{imp}}{S_B} \quad \text{Éq. 3.26} \dots\dots\dots 52$$

$$\chi_T = \chi_0 * \chi_g \quad \text{Éq. 3.27} \dots\dots\dots 52$$

$$\gamma = \frac{\Delta V}{\Delta S} = \frac{(V_B - V_{imp})}{(S_B - S_{imp})} \quad \text{Éq. 3.28} \dots\dots\dots 52$$

$$\dot{\gamma}_s = \frac{6Q_0}{W H^2} \quad \text{Éq. 4.1 60}$$

$$\dot{\gamma}_c = \frac{2Q_0}{R_h A} \quad \text{Éq. 4.2 60}$$

$$Ka = \frac{\sigma^3 \rho}{g \mu^4} \quad \text{Éq. 4.3 74}$$

$$Re = \frac{\rho u d}{\mu} \quad \text{Éq. 4.4 74}$$

$$Re = 0,0023 Ka^{0,29} \quad \text{Éq. 4.5 74}$$

$$Re = 0,004 Ka^{0,26} \quad \text{Éq. 4.6 74}$$

$$Q_{\min} = 0,5 * \mu^{-0,16} * \sigma^{0,86} * \rho^{0,29} \quad \text{Éq. 4.7 74}$$

$$Q_{\min} = \mu^{-0,04} * \sigma^{0,78} * \rho^{0,26} \quad \text{Éq. 4.8 74}$$

$$Ka = \frac{\sigma^3 \rho}{g \mu^4} = \left[\frac{\left(\frac{\sigma}{e} \right)}{\left(\frac{\mu^* u}{e} \right)} \right]^2 * \left[\frac{\left(\frac{\sigma}{e} \right)}{(\rho g e)} \right] * \left[\frac{(\rho^* u^2)}{\left(\frac{\mu^* u}{e} \right)} \right]^2 \quad \text{Éq. 4.9 76}$$

$$Re = K_2 * \left[\frac{\left(\frac{\sigma}{e} \right)}{\left(\frac{\mu^* u}{e} \right)} \right]^{n_1} * \left[\frac{\left(\frac{\sigma}{e} \right)}{(\rho g e)} \right]^{n_2} \quad \text{Éq. 4.10 77}$$

$$Re = A * Ka^n = 0,57 Ka^{0,25} \quad \text{Éq. 4.11 81}$$

Liste des Abréviations

CAO Conception Assistée par Ordinateur

CFD Computational Fluid Dynamics

CIPP Centre intégré en pâtes et papiers

CMC Carboxyméthyl-cellulose

Cmc Concentration micellaire critique

C-PAM Polyacrylamide Cationique

CS Amidon Cationique

CTMP Pâte chimico-thermomécanique

DP Degré de Polymérisation

DS degré de substitution

GL&V Groupe Laperrière et Verreault

H-R Humidité Relative

H-S HydraSizer

L-MNFC Micro-Nano-Fibrillated-Cellulose in a low fibrillated state

MCC micro-crystalline cellulose

M-CMC Micro-Nano-Fibrillated-Cellulose- Carboxyméthyl-cellulose-NIAPROOF

MFC microfibrillated cellulose

MNFC Micro-Nano-Fibrillated-Cellulose

M-CMC-NIA Micro-Nano-Fibrillated-Cellulose- Carboxyméthyl-cellulose-NIAPROOF

M-NIA Micro-Nano-Fibrillated-Cellulose-NIAPROOF

NFC nano-fibrillated cellulose

TCF Totally Chlorine Free

OTR oxygen transmission rate

PEO Poly Oxyde d'éthylène

R_e Nombre Reynolds

W_e Nombre de Weber

Wt Weight

Chapitre 1 - Introduction

L'industrie canadienne des pâtes et papiers est l'une des industries les plus importantes du pays. En 2017, la production canadienne des pâtes et papiers a totalisé environ 22 millions de tonnes, dont environ 19% du papier journal, dont le Canada est le plus important producteur au monde depuis plus de 50 ans. La valeur des exportations de tous les produits forestiers a augmenté à l'exception du papier d'impression et d'écriture et du papier journal, qui ont respectivement diminué de 8.2 % et de 10.1 % en raison de la chute de la demande et de la production [1]. Environ 22% des exportations sont des pâtes de bois destinées à être transformées en papier et carton, et 11% sont constitués d'une grande variété de papiers journal et d'impression et d'écriture. Le Québec représente la plus grande part de la production totale des pâtes et papiers, environ 35%; L'Ontario représente environ 25%; Colombie-Britannique 22%; et les provinces de l'Atlantique représentent ensemble environ 18% [1].

Le procédé de la pâte thermomécanique (TMP) constitue l'une des bases de l'industrie papetière au Canada [2]. En raison des technologies de l'information liées à l'avènement de l'électronique, la part du marché du papier diminue chaque année mais la demande globale en papiers est toujours en croissance d'ici 2025. Face à cette situation, le Canada vise la production de la pâte TMP pour le marché du papier emballage et comme elle n'est pas assez résistible, il faut la valoriser par l'association avec d'autres matériaux. De ce fait, plusieurs projets ont été lancés. L'émergence de nouveaux produits cellulosiques de haute technologie, tels que la nanocellulose et les micro fibrilles de cellulose, parfois appelés « filaments de cellulose », offre de nouvelles possibilités de valoriser la TMP en améliorant ses propriétés mécaniques. La nanocellulose est un matériau cellulosique composé de cristaux et / ou de fibrilles de cellulose de taille nanométrique (en termes de diamètre ou de largeur). La cellulose étant un composé organique abondant provenant de la biomasse, la nanocellulose est également considérée comme provenant de ressources forestières renouvelables. En tant que type de nanocellulose ou de « filaments de cellulose », la micro-nanocellulose fibrillée (MNFC) présente un potentiel d'application intéressant dans la fabrication du papier. Comme il a été démontré que la micro cellulose fibrillée

(type de MNFC) peut réussir à améliorer les propriétés mécaniques et les propriétés de barrière du papier [3], l'intégration de la MNFC dans les produits en papier suscite de plus en plus d'intérêt. Le réseau ArboraNano (actif de 2009 à 2014), dont l'objectif est de développer des applications de nanomatériaux, mais principalement de nanocellulose, dans les produits forestiers, a été créé pour soutenir les nouveaux débouchés de l'économie canadienne en utilisant les ressources forestières renouvelables. Le but du projet de l'UQTR-ArboraNano est d'appliquer la MNFC lors de la fabrication du papier en tant que couche structurante afin d'améliorer les propriétés mécaniques et de barrière de la feuille de TMP. Cela peut être réalisé commercialement en utilisant l'Hydra-Sizer™, un équipement de couchage rideau développé par GL&V pour être intégré à la partie humide de la machine à papier. Pour conserver les propriétés spécifiques liées à la micro-nanostructure de la cellulose, les fibrilles doivent conserver leur dimension micro-nanométrique: c'est-à-dire qu'elles ne doivent pas s'agglomérer et qu'elles doivent ensuite être bien dispersées. Dans cette perspective, le projet de la présente thèse consiste à l'utilisation des dispersants (Carboxymethyl cellulose : CMC) est l'une des approches les plus utilisées pour traiter ce problème. En outre, la stabilité du rideau est fortement liée à la tension de surface des suspensions MNFC, d'où l'intérêt d'utilisation des tensioactifs. Pour incorporer une couche de MNFC dans la structure du papier, nous pouvons intervenir avant la fin de la formation du papier, donc en partie humide sur la table de formation (contrôle du drainage). Les objectifs de la thèse s'articulent sur les points suivants :

- Étude des propriétés rhéologiques et physiques des mélanges contenant des MNFC au niveau de l'application sur machine à papier.
- Analyse de l'écoulement des suspensions L-MNFC.
- L'inclusion des MNFC et charges à différentes profondeurs dans l'épaisseur du papier sur machine à papier.

L'HydraSizer™ permet d'appliquer un rideau liquide sur la surface du papier. Le système HydraSizer™ a été développé initialement pour l'utilisation de solution d'amidon. La problématique est donc de savoir quel est le comportement d'une suspension MNFC dans l'HydraSizer™ et quel est son impact sur le couchage rideau et ainsi sur la formation du papier. Pour répondre à cette problématique, l'analyse des propriétés des suspensions

MNFC et leur effet sur la stabilité du rideau est nécessaire. Une analyse d'écoulement permettra de déterminer Le domaine opérationnel des suspensions MNFC dans l'HydraSizer™. Le cœur du travail se concentre à la fois sur l'analyse des propriétés physiques et rhéologiques des suspensions MNFC et sur l'analyse de l'écoulement interne (dans la cavité d'HydraSizer™) puis une analyse de l'écoulement externe pour les différentes suspensions proposées. Pour mener à bien ce projet, une revue de littérature a été structurée sur les caractéristiques de la MNFC, sur les interactions entre CMC et MNFC et sur le procédé du couchage rideau (paramètres, physique et écoulement). Les matériels et les méthodes sont ensuite présentés, suivis des résultats et discussions.

Chapitre 2 - Revue de littérature

2.1 Fibrilles de cellulose : Méthodes de préparation et prétraitement

Le terme cellulose microfibrillée (MFC) a été utilisé pour la première fois par Turbak *et al.* [4], qui ont réussi à réaliser un premier isolement de micro fibrilles de cellulose avec un homogénéisateur de lait [5] (Figure 2.1). La préparation de la micro nanocellulose fibrillée (MNFC) est essentiellement constituée par des traitements mécaniques, les principaux procédés sont présentés ci-après.



Figure 2.1 Gel de MFC [4]

2.1.1 Homogénéisateur

Pendant l'homogénéisation, les suspensions de raffinage diluées sont pompées à haute pression pour alimenter un ensemble de soupapes à ressort. Comme cette vanne s'ouvre et se ferme en succession rapide, les fibres sont soumises à une chute de pression importante avec des hautes forces de cisaillement et d'impact. Cette combinaison de forces favorise un degré élevé de microfibrillation, conduisant ainsi à la production de la MNFC [3].

2.1.2 Broyeur

Des broyeurs modifiés avec des disques spécialement conçus sont aussi utilisés pour produire de la MNFC. La compagnie MASUKO a été la première à construire et à vendre ce type d'équipement. Le principe consiste en la rupture de la structure de la paroi cellulaire par l'action des forces de cisaillement générées par la meule. Les fibres de

cellulose sont broyées entre deux meules en pierre. Une meule est fixe et l'autre est en rotation à haute vitesse. Les nanofibres qui composent la paroi cellulaire sont ainsi individualisées à partir de la pâte. Après cinq passes, la plupart des fibres sont devenues de taille nanométrique. Avec un nombre de passes supérieur, aucune modification significative n'est observée dans la morphologie des fibres [6]. Dans le but d'obtenir des fibres qui sont moins rigides et cohésives, et aussi afin de diminuer la consommation en énergie, des prétraitements sont souvent utilisés.

2.1.3 Prétraitement alcalin

Le but du prétraitement alcalin, par exemple avec NaOH, est de séparer la lignine et les hydrates de carbone. L'extraction alcaline nécessite d'être bien contrôlée pour éviter la dégradation de la cellulose et s'assurer que l'hydrolyse se produit uniquement à la surface des fibres [7].

2.1.4 Prétraitement enzymatique

Dans la nature, la cellulose n'est pas dégradée par une enzyme unique, mais un ensemble de cellulases sont impliqués. Celles-ci peuvent être classées comme des cellulases du type A-B, appelées cellobiohydrolases, en mesure d'attaquer la cellulose hautement cristalline, et les cellulases du type C-D ou endoglucanases qui nécessitent généralement un certain désordre dans la structure, soit une structure en partie amorphe, afin de dégrader la cellulose [7]. Pääkkö *et al.* [8] constatent que le prétraitement par endoglucanase facilite la désintégration des fibres de la pâte en MNFC. En effet, l'hydrolyse enzymatique est moins agressive que l'hydrolyse acide et n'attaque que les zones amorphes [3].

2.1.5 Prétraitement Oxydant

Saito *et al.* ont utilisé un prétraitement par oxydation de la cellulose, en traitant les fibres par des radicaux 2,2,6,6-tetramethylpi-peridine-1-oxyle (TEMPO) avant de les mélanger [7]. L'oxydation TEMPO est un procédé prometteur pour la modification de la surface de la fibre de cellulose parce que des groupements fonctionnels carboxyles ou aldéhydes peuvent être introduits dans la cellulose [9, 10].

2.2 Propriétés de la MNFC

2.2.1 Propriétés mécaniques

Henriksson *et al.* ont développé des composites à partir de la MNFC et de la résine mélamine formaldéhyde (MF) comme matériau pour membrane de haut-parleur. Ces composites ont un module de Young de 16.6 GPa et une résistance à la traction de 142MPa [7]. Dans une étude de Nakagaito, les composites conçus avec de la MNFC produite par 16 à 30 passes à travers un raffineur, suivie d'une homogénéisation à haute pression, possèdent un module de Young et une résistance à la flexion de 19 GPa et 370 MPa, respectivement [11, 12].

2.2.2 Propriétés barrières

Les études portant sur les propriétés barrières à l'air des films de MNFC indiquent des faibles taux de transfert (9 à 13 nm. Pa⁻¹. s⁻¹) [13]; ce qui explique l'intérêt pour les études de perméabilité à l'oxygène. Dans une étude de l'influence d'acétylation sur l'OTR (Oxygen Transmission Rate), Rodionova *et al.* remarquent que les films acétylés ont un OTR (taux de transfert d'oxygène) plus élevé (de 6 à 11 ml.m⁻².j⁻¹) que les films de MNFC pur (4.2 ml.m⁻².j⁻¹): ce qui est probablement dû à l'hydrophilisation de la surface de la MNFC [14]. En outre, les films MNFC peuvent être utilisés pour d'autres barrières à savoir : barrière aux graisses, barrière aux liquides (solvants, eau...) et barrière à la vapeur d'eau.

2.2.3 Propriétés rhéologiques

Plusieurs travaux montrent que la viscosité de toutes les suspensions de MNFC diminue avec le taux de cisaillement; ce qui se réfère à un comportement rhéofluidifiant [3]. La rhéologie dynamique de la MNFC à différentes concentrations (0.125 à 5.9 wt%) a été mesurée en utilisant un rhéomètre à contrainte contrôlée par Pääkkö *et al.* [8]. Saito *et al.* évaluent les propriétés d'écoulement des suspensions de la MNFC prétraitée par le TEMPO en fonction du temps d'agitation qui reflète le degré de dispersion des fibrilles de la MNFC oxydée dans l'eau. Les dispersions présentent un comportement rhéofluidifiant après 12 h d'agitation par un agitateur magnétique. La viscosité de la

suspension à 0.1% augmente. Après 3 jours d'agitation, la viscosité commence à diminuer; ce qui peut être dû à la transformation de tous les agrégats de MNFC en fibrilles individuelles [15]. La rhéologie de la MNFC à différentes concentrations (1 à 4 %) et à différentes températures (25 à 60 °C) est étudiée par Iotti *et al.*[16]. L'étude montre l'apparition d'une hystérésis à des taux de cisaillement élevés (de 180 à 300 s⁻¹).

2.3 Dispersion de la MNFC

Les concepts de fibrillation et de dispersion se confondent facilement. La fibrillation désigne le délaminage partiel des fibres lors du traitement mécanique. Le niveau de fibrillation résultant d'un tel traitement mécanique ne peut donc pas être modifié après la production de MNFC. La dispersion est la séparation des fibrilles, est opposé à la floculation ou à l'agglomération. La dispersion pourrait être améliorée par l'ajout d'un dispersant. L'adhésion cellulose-cellulose, qui a fait l'objet d'une attention considérable au cours des cinquante dernières années, se déroule sur une échelle de longueur pratique allant du nanomètre au millimètre [17]. Pour la nanocellulose, une très grande surface spécifique fait des propriétés d'adhérence le paramètre le plus important à contrôler pour les applications nanocomposites [18]. Une bonne dispersion des suspensions de MNFC facilite la formation de réseaux solides et améliore donc les propriétés mécaniques et barrières des films de nanocellulose, des nanocomposites et des papiers couchés avec de la MNFC.

2.3.1 Agent dispersant: la carboxyméthylcellulose (CMC)

Il a été observé dans la littérature que la dispersion de fibres cellulosiques pourrait être améliorée de façon notable par l'utilisation d'un dérivé cellulosique anionique tel que la carboxyméthylcellulose (CMC) [18, 19]. Cette section présente les effets de la dispersion par CMC et le mécanisme potentiel impliqué.

2.3.2 Effet de dispersion par CMC sur la fibre

L'adsorption de CMC sur les nanofibrilles de cellulose a été explorée par Ahola *et al.*[19], qui montrent que l'adsorption de CMC est réversible sur la surface du film de nanofibrilles et que cette adsorption entraîne des effets de dispersion. Les effets de dispersion de la

CMC ont également été étudiés sur la cellulose microcristalline (MCC), (Figure 2.2). La CMC est adsorbée à la surface du MCC et le réseau de gel tridimensionnel stable des dispersions colloïdales de MCC est stabilisé par répulsion électrostatique.

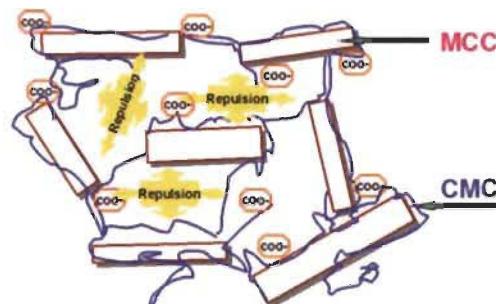


Figure 2.2 Effets de la CMC sur les dispersions de MCC colloïdal [19]

2.3.3 Effet de dispersion par CMC sur la rhéologie de la MNFC

Les effets de la CMC sur la rhéologie des MNFC ont été explorés par Vesterinen *et al.* [20]. Dans l'article, les valeurs de viscosité relative (c'est-à-dire le rapport entre les viscosités de la solution de polymère et des suspensions de MFC) pour quatre polymères différents: amidon cationique (CS), polyacrylamide cationique (C-PAM), CMC, poly (oxyde d'éthylène) (PEO) sont montrées (Figure 2.3). Pour la solution MFC / CMC, le comportement rhéofluidifiant à fort cisaillement de la MFC disparaît et donc la CMC peut diminuer la viscosité de la MFC. Les auteurs supposent que la CMC a un certain effet dispersant dans le système et qu'elle diminue probablement la quantité d'eau libre dans la suspension.

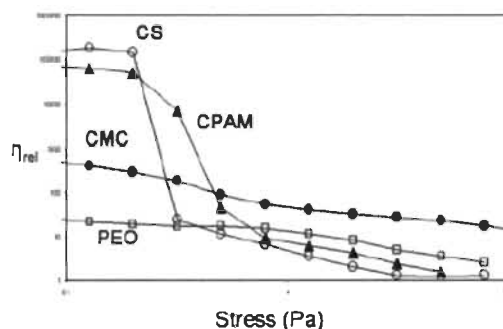


Figure 2.3 Viscosité relative des suspensions de polymère et de MNFC [20]

Après avoir présenté les principaux points sur les micro-nano fibrilles de cellulose en fonction des procédés de fabrication et des propriétés mécaniques et barrières, nous nous

sommes intéressés à traiter plus en détail les propriétés rhéologiques et physiques des suspensions de MNFC. En effet, la description du comportement rhéologique des différentes suspensions est une étape nécessaire afin d'étudier l'écoulement lors du couchage du papier; et plus spécifiquement lors de l'écoulement dans l'HydraSizer™; ce qui est l'objectif principal de notre travail de recherche. L'HydraSizer™ étant, à toutes fins pratiques, un type de couchage rideau sur machine à papier, le chapitre qui suit se consacre au procédé du couchage rideau; soit une revue de littérature incluant la physique, les paramètres et les défauts inhérents à ce type de processus.

2.4 Couchage rideau

Le couchage rideau est un procédé qui permet le dépôt d'un film liquide sur une surface en mouvement. L'intérêt de ce procédé pour le projet est de modifier les propriétés de surface et d'améliorer l'aspect et l'imprimabilité du papier et des propriétés barrières en exploitant les propriétés de la MNFC.

2.4.1 Contexte et technologies

Le procédé a été utilisé depuis des années dans les industries alimentaires et photographiques. Il y a environ 30 machines dans le monde, et ce, au niveau de la fabrication industrielle à grands volumes de papiers, il en existe probablement davantage pour la fabrication de certains papiers spéciaux de petits volumes de fabrication, les emplacements et les caractéristiques des plus récentes sont rassemblés au Tableau 2.1.

Tableau 2.1 Entreprises qui ont récemment mis en place des coucheuses rideaux avec leurs principaux produits

Firm	Country City	Products	Date of settling up	Machine speed	Machine width
Mayr-Meinhof	Austria Frohnleiten	Coated Cartonboard	2010	550 m/min	4m
Dong li	South Korea Ansan	Paperboard White Liner	2006	800 m/min	4.1 m
Juho Thermal	Finland	Thermal paper	2006	1500 m/min	2.5 m
Mitsubishi paper mills	Japan Takasago	Photo paper Inkjet paper Colour paper Carbonless paper	2000	1050-1250 m min	1.7 to 2.6 m
August Koehler group	Germany Oberkirch Kehl	Thermal paper Inkjet paper Thin paper	2001	1500 m/min	4.2 m

La technologie sans contact présente de nombreux avantages potentiels par rapport aux autres méthodes traditionnelles telles que le couchage à lame ou l'enduction par « presse encolleuse ». En effet, la technologie permet de donner une grande uniformité dans l'épaisseur du couchage comme l'expliquent Endres et Tietz [21], Il y a deux types de technologies utilisées dans le couchage du papier: la buse à fente qui est habituellement utilisée avec une seule couche comme représenté à la (Figure 2.4) et la technologie multicouche.

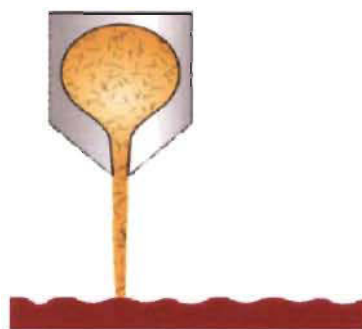


Figure 2.4 coucheuse rideau à buse

2.4.2 Physique du couchage rideau

Weinstein *et al.* examinent les éléments de l'écoulement du procédé du couchage rideau avec une approche physique (approche mécaniques des fluides) [22]. Ils notent que certains éléments de flux sont bien étudiés et compris, tels que la couche limite le long d'une paroi mobile qui désigne la zone d'interface entre la bande et le rideau environnant lors d'un mouvement relatif entre les deux, conséquence de sa viscosité, la ligne de mouillage dynamique, etc..., alors que d'autres nécessitent encore un complément, notamment l'écoulement sur un plan incliné et le rideau liquide en chute libre. Lors du procédé du couchage rideau, un rideau stable est nécessaire, ce qui est difficilement obtenu dans diverses conditions de fonctionnement [23].

Dans la littérature, il existe de nombreux articles traitant des problèmes liés à la ligne de contact dynamique pour obtenir un film uniforme et stable sur le papier, par exemple ceux de Black *et al.*, et Shikhmurzaev *et al* [24, 25]. D'autres ont étudié la stabilité du rideau lui-même et ont trouvé des variables pour optimiser un dispositif de couchage rideau: à savoir la vitesse de la bande et la formulation du couchage [26]. La stabilité du rideau est

un problème techniques majeur limitant l'acceptation commerciale de la coucheuse rideau. Pour comprendre les causes de ces limitations, une compréhension des opérations de base d'une machine à couchage rideau doit être atteinte. Une illustration d'une coucheuse rideau est représentée sur la (Figure 2.4).

Comme le montre l'illustration, le principe d'une opération couchage rideau est l'écoulement à travers une fente, afin de produire un rideau liquide à travers la machine à papier. Le liquide sort de la fente, forme un rideau et heurte le papier en mouvement. La bande en mouvement entre en contact avec le rideau, en le tirant dans le sens de la machine à papier. Le dosage est réalisé en contrôlant l'épaisseur du rideau de revêtement. Le procédé du couchage rideau peut être divisé en trois zones distinctes (Figure 2.5):

- Zone de formation de rideau
- Zone de rideau
- Zone d'impact

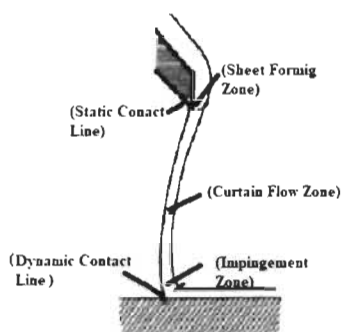


Figure 2.5 Les trois zones du procédé couchage rideau [27]

La zone de formation de la feuille commence lorsque le liquide quitte la filière. La conception interne de la filière et la rhéologie du liquide sont les questions les plus importantes relatives à la performance de la coucheuse dans cette zone. Les conceptions de fentes sont sensibles à la rhéologie et à la vitesse du liquide. Par conséquent, elles doivent être conçues de manière à permettre d'obtenir un profil d'écoulement parfaitement développé et stable dans la fente en très peu de temps. Il est aussi important qu'aucune

séparation d'écoulement ne se produise dans la fente. Le phénomène de la séparation du flux peut être causé par la présence des bouchons le long de la fente. Pour éviter cette séparation, un contrôle efficace de l'ouverture de la fente est nécessaire. La zone de rideau commence par le développement d'un rideau lorsque le fluide s'écoule de la filière. Dans cette zone, la stabilité du rideau résultent d'une relation complexe entre les forces d'inertie, visqueuses, de surface, d'extension, de cisaillement et de gravitation [28, 29]. Ainsi, la rhéologie et les caractéristiques de surface du revêtement jouent un rôle important. Le point de contact entre le rideau en chute libre et le substrat en mouvement et l'espace adjacent est appelée zone d'impact. L'interaction complexe entre le substrat et le rideau est une science en développement, La présence d'air dans la couche limite, associée au mouvement du substrat rugueux, ajoute de la complexité à ces interactions. Cette complexité est dû à la présence d'une phase gazeuse dans le liquide en produisant un reflux du rideau. Une fois que l'opération de base de la coucheuse rideau est comprise, les paramètres opérationnels qui contrôlent la stabilité du rideau peuvent être examinés. Une compréhension de la physique de la formation du rideau existe depuis des décennies. En 1961, Brown [30] proposa les équations principales pour décrire le processus, Ces équations principales sont très utiles pour comprendre les principes fondamentaux régissant l'influence des interactions entre les forces de tension inertielle et superficielle sur la stabilité du rideau. Kistler [31] a montré la dépendance de la stabilité du rideau, du nombre de Reynolds (Re) (nombre qui représente le rapport entre les forces d'inertie et visqueuses et qui caractérise le régime d'écoulement), du rapport de la vitesse de la bande U , à la vitesse d'impact V , et du nombre de Weber (We) (Figure 2.6). À partir de cette figure, la fenêtre opérationnelle pour le poids de la couche, le nombre de Reynolds et les rapports U/V a été définie pour leur système donné (Figure 2.7). Triantafillopoulos *et al.*[23] ont montré la même chose expérimentalement.

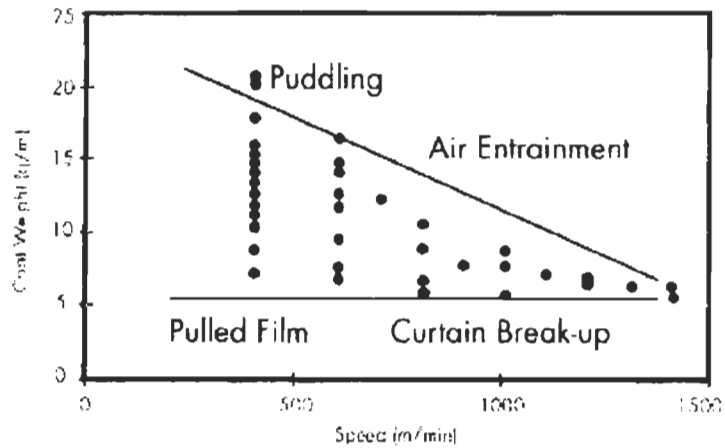


Figure 2.6 Influence de la vitesse de la bande (U) sur le développement du poids de la couche [27].

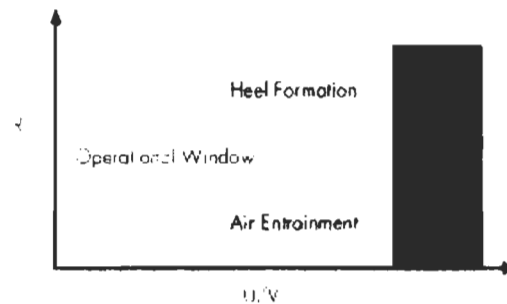


Figure 2.7 Fenêtre opérationnelle proposée pour coucheuse rideau [27]

2.4.3 Condition de stabilité du rideau

La stabilité d'un rideau est liée au nombre de Weber. Le nombre de Weber est un paramètre d'écoulement sans dimension, qui relie les forces d'inertie aux forces de tension de surface du rideau. Avant, on pensait qu'un nombre de Weber > 2 était nécessaire pour obtenir un rideau stable (équation 2.1 et équation 2.2) [27]. Par contre, une analyse de la physique de l'écoulement des fluides propose que les mêmes critères puissent être satisfaits avec des forces d'inertie inférieures ou un nombre de Weber > 1.5 [27]. De la Figure 2.8, on voit que la condition pour former un rideau liquide est,

$$\rho V^2 H > 2\sigma \quad \text{Éq. 2.1}$$

$$We_e > 2 \quad \text{Éq. 2.2}$$

ρ = Masse volumique du rideau

V = Vitesse d'impact

σ = Tension de surface du rideau

H = Hauteur du rideau

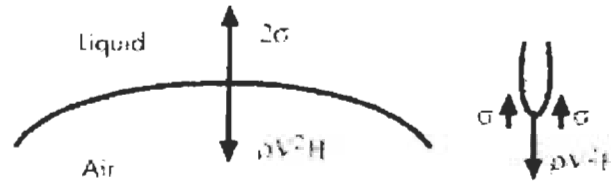


Figure 2.8 Forces inertielles et de tension de surface dans la formation du rideau [27]

Comme mentionné sur l'équation 2.1, la stabilité du rideau augmente avec la vitesse d'écoulement, le débit et avec la diminution de la tension de surface du fluide. Les fluides avec un nombre de Weber moins que 2 peuvent être stables si la viscosité est suffisamment élevée. Ici le rideau est fortement étiré étant donné que la vitesse de la bande du papier est plusieurs fois supérieure à sa vitesse. Un étirement insuffisant du film conduit à une couverture Inégale de la surface.

Afin de comprendre le fonctionnement d'une coucheuse rideau et la dynamique de la formation du film dans la zone d'impact, il est important de définir les trois phénomènes physiques : formation du talon, formation des brins (strands) et un film tiré. Un schéma de chaque phénomène est présenté à la Figure 2.9 et décrit ci-dessous [23].

- Talon-Le talon est formé lorsque le rideau n'est pas complètement déplacé dans la direction de la bande, mais coule légèrement dans la direction opposée,
- Brins -Les brins sont dus à un écoulement insuffisant, ce qui provoque la rupture du rideau formé et sa contraction en brins,
- Film tiré -Un film tiré se produit lorsque le couchage ne parvient pas à toucher le substrat juste en dessous de la fente et est tiré vers l'avant avec la bande.

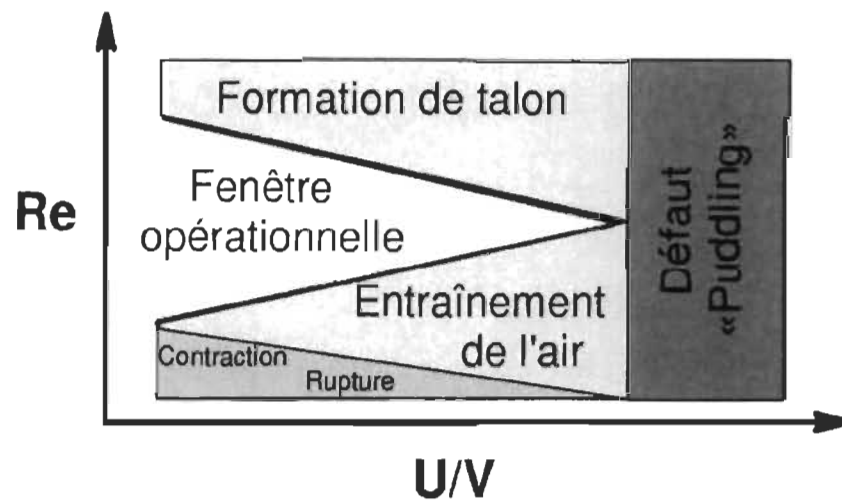


Figure 2.9 Fenêtre opérationnelle pour couchage rideau [23]

En dehors de la fenêtre opérationnelle le couchage rideau est impossible à réaliser en raison des phénomènes critiques suivants [23] :

- Rupture du rideau à faible débit,
- Entraînement de l'air et une couverture insuffisante à haute vitesse et à faible débit,
- Formation du talon à grand débit et à faible vitesse,
- Entraînement de l'air avec formation du talon à grand débit et à haute vitesse,
- Défaut « Puddling » au-delà d'une certaine vitesse.

Une optimisation précise et efficace doit être réalisée pour obtenir un procédé en contrôle, la détermination du débit ainsi que la vitesse d'écoulement est primordiale pour réussir le couchage rideau. Les trois phénomènes se positionnent intensivement vu que le procédé est à grande vitesse.

Des travaux de simulation numérique de l'écoulement du fluide dans le talon formé (zone d'impact) sont réalisés par Wilson *et al.*[32]. Ces travaux ressemblent aux travaux faits

par Kistler [31]. Ils ont expliqué les paramètres rhéologiques importants pour développer des modèles d'écoulement dans le talon formé. Le procédé du couchage rideau est influencé par plusieurs paramètres: hauteur du rideau, tension de surface du fluide et la rhéologie du couchage. Dans la section qui suit, une explication du rôle de chacun des paramètres et leur influence sur le couchage rideau est discuté.

2.5 Paramètres du couchage rideau

Une explication du rôle de chacun de ces paramètres sur le procédé du couchage rideau va est discutée pour en comprendre l'importance.

2.5.1 Hauteur du rideau

L'écoulement de rideau est le résultat d'interactions complexes entre les forces d'extension gravitationnelles et les forces de surface, qui sont influencées par des facteurs tels que la rhéologie du fluide, la différence de vitesse entre le rideau et la toile et la hauteur du rideau. Le rideau sort de la buse de l'applicateur, puis tombe sous l'influence de la gravité jusqu'au point où il entre en contact avec la bande en mouvement. La hauteur du rideau influence la vitesse du rideau comme suit:

$$V^2 = V_0^2 + 2gH \quad \text{Éq. 2.3}$$

V_0 représente la vitesse du rideau à la sortie de la lèvre d'applicateur et H est la hauteur de chute du rideau. Le nombre de Reynolds est généralement faible dans la filière, de sorte que les vitesses sont très faibles. Ainsi, V_0 peut être négligé à toutes fins pratiques et la vitesse du rideau peut être considérée comme une chute libre. Un rideau stable, $We > 2$, peut être obtenu en modifiant la vitesse du rideau en ajustant la hauteur. L'effet de la hauteur du rideau sur la stabilité du rideau, à une tension de surface donnée, est un facteur dominant. De cela, l'étude de la tension de surface dynamique en fonction de l'âge de surface est nécessaire pour optimiser la hauteur car l'âge de surface est directement lié à la hauteur du rideau.

2.5.2 Tension de surface et âge de surface

La stabilité du rideau est associée à l'augmentation de la surface spécifique de la couche du rideau [33]. La tension de surface dynamique des sauces de couchage est souvent utilisée pour évaluer la stabilité du rideau. Pour former un rideau stable à faible débit, la tension de surface doit être réduite afin de maintenir un nombre de Weber approprié ($We > 2$). L'utilisation d'agents tensioactifs est reconnue comme une approche facile et utile pour augmenter la stabilité du rideau[34]. Cependant, un agent tensioactif tend à accroître l'effet moussant des sauces de couchage et génère souvent plus de bulles d'air provoquant des défauts de couchage dans le produit final. Les agents tensioactifs présents dans la couche peuvent également provoquer une absorption rapide des encres d'imprimerie résultant en une faible densité d'impression [33]. Un grand nombre d'agents tensioactifs d'efficacités différentes existe, ce qui rend le choix du tensioactif critique. De plus, dans tout processus dynamique l'âge de surface peut devenir important. Comme illustré à la (Figure 2.10), la tension de surface d'un rideau change avec la hauteur du rideau en raison de la variation de surface. L'âge de la surface du processus est calculé à partir du moment où le rideau sort de l'applicateur jusqu'au moment du contact avec le papier. La hauteur du rideau est donc liée à l'âge de la surface. La variation de la tension de surface avec l'âge de la surface est considérée comme la propriété la plus importante de l'agent tensioactif. Afin de réduire la tension de surface du couchage, un agent tensioactif anionique, couramment utilisé dans l'industrie du papier, soit le NIAPROOF est utilisé [35].

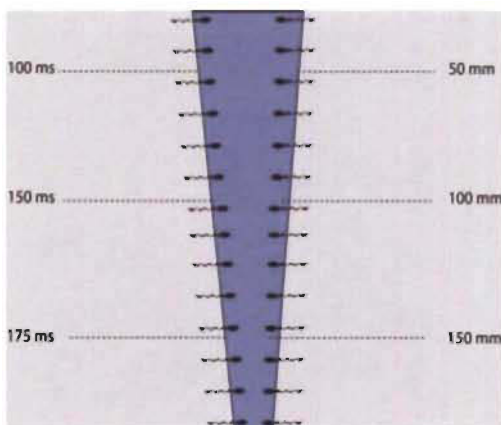


Figure 2.10 Tension de surface et âge de la surface

2.5.3 Rhéologie du couchage

Les paramètres rhéologiques importants pour le bon fonctionnement d'une coucheuse rideau varient dans les 3 zones de l'écoulement décrites précédemment (répartition du flux dans la filière, la zone de formation du rideau et la zone d'impact). Étant donné que le flux est en extension, les paramètres de rhéologie extensionnels sont applicables. D'après Guyon et *al.*[36], les écoulements de cisaillement simple sont la superposition d'une déformation du fluide et d'une rotation (Figure 2.11a). Pour un fluide newtonien, la viscosité η est constante. Pour un fluide complexe, la viscosité peut dépendre du taux de cisaillement, du temps voire d'autres paramètres, notamment seuil de contrainte, température, etc. Un écoulement en élongation est un écoulement pour lequel le fluide ne subit aucune rotation (Figure 2.11b). La viscosité élongationnelle ou extensionnelle est le paramètre qui quantifie la résistance du fluide à l'élongation et est notée η_e . La viscosité extensionnelle est constante pour un fluide newtonien ($\eta_e = \eta$) alors qu'elle peut dépendre du temps et du taux d'élongation pour un fluide complexe.

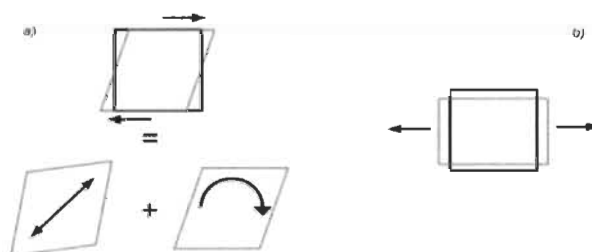


Figure 2.11 Déformation d'un fluide a) en cisaillement simple et b) en élongation

Plusieurs dispositifs sont utilisés pour examiner les propriétés rhéologiques des fluides en cisaillement simple et en élongation, à savoir : le rhéomètre rotatif et le rhéomètre à rupture capillaire. Les propriétés rhéologiques jouent un rôle important dans le couchage du papier. Dans le cas du couchage rideau, la stabilité du rideau, est fortement associée aux caractéristiques rhéologiques des sauces de couchage. La viscosité étant reconnue comme la propriété la plus importante du procédé, des modificateurs de rhéologie ou épaississants sont souvent utilisés pour modifier la viscoélasticité de la sauce de couchage [33].

2.5.4 Débit (poids de couche)

Le débit, ainsi que la vitesse de la bande, déterminent le poids de couche réalisable. La stabilité du rideau est également liée au poids de la couche grâce au terme d'inertie ($\rho V^2 H$) dans le nombre de Weber (équation 2.1). Dans la section précédente, une revue du procédé couchage rideau a été présentée. La compréhension de l'écoulement du rideau à l'intérieur et à l'extérieur du dispositif du couchage est primordiale pour assurer un couchage homogène. Dans la partie qui suit, une bibliographie détaillée sur l'écoulement interne et externe du rideau est présentée.

2.6 Écoulement interne

L'uniformité de l'écoulement est un point essentiel dans le procédé de couchage rideau. À l'intérieur de la coucheuse, la distribution du flux à travers la filière a un effet prépondérant sur l'uniformité de l'écoulement à l'extérieur de la coucheuse. La distribution du flux est essentiellement liée à la géométrie du dispositif composé principalement de cavités et de fentes (Figure 2.12). Le but des cavités internes de la filière de couchage rideau est d'assurer une meilleure distribution de la sauce [37].

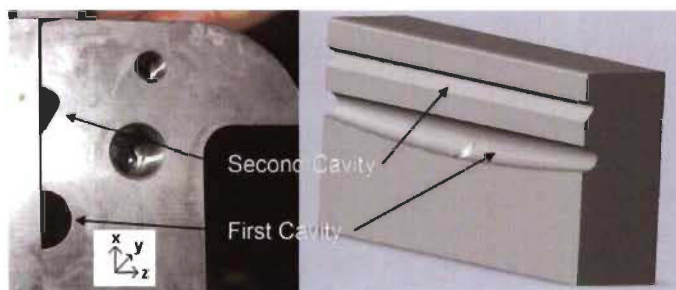


Figure 2.12 Exemple d'une coucheuse rideau pilote et formes des cavités[37]

Dans la majorité des conceptions des filières du couchage rideau, les cavités ont une forme générale commune: elles sont orientées dans la direction transversale de la bande et sont reliées à la fente. L'écoulement dans la cavité est caractérisé par une faible résistance en raison d'une surface relativement grande tandis que la conception de la fente offre une grande résistance à l'écoulement. Grâce à une telle structure, le fluide tend à se répartir dans la cavité avant d'entrer dans la fente. D'après la littérature [38], il y a deux types de cavités (Figure 2.13):

- Cavité en forme de « T »
- Cavité en forme d'arc

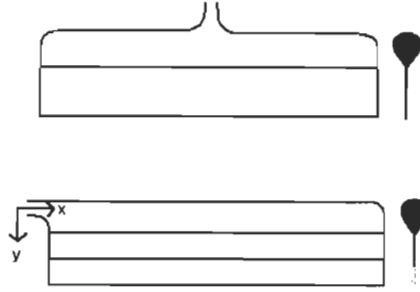


Figure 2.13 Deux Conceptions de la cavité : en forme de T et en forme d'arc

La cavité en forme de « T » est caractérisée par une section uniforme sur toute la largeur et une résistance à l'écoulement égale le long de cette surface. Le principe de conception est de minimiser la variance de l'épaisseur du rideau [39]. L'autre cas est la cavité en forme d'arc avec une conception qui permet de maintenir un gradient de pression constant à l'entrée de la fente et d'avoir un débit constant en sortie [37].

2.6.1 Équations d'écoulement interne

L'écoulement du rideau dans la cavité et dans la fente est décrit par les deux équations fondamentales de la mécanique des fluides: l'équation de conservation de la quantité de mouvement et l'équation de continuité. L'équation de conservation de la quantité de mouvement pour un débit constant du rideau dans la cavité est donnée par la forme générale:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{dP}{dx} - \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} - \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} - \rho g \right) \quad \text{Éq. 2.4}$$

Où: u , v et w sont les composantes cartésiennes du vecteur de la vitesse du rideau, τ est le tenseur des contraintes, P est la pression dans la cavité, g est la gravité et ρ est la masse volumique du rideau. En outre, l'écoulement peut être décrit par l'équation de continuité qui a la forme générale suivante:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \operatorname{div} \vec{V} = 0 \quad \text{Éq. 2.5}$$

L'équation précédente peut s'écrire sous une forme simplifiée en considérant que le rideau est un fluide incompressible ($\rho = \text{constante}$):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \text{Éq. 2.6}$$

Le développement des deux équations fondamentales pour des géométries de couchage rideau, soit des cavités, permet par exemple d'examiner l'effet de la viscosité, de l'accélération inertielle et de la gravité sur la variation de la pression hydrodynamique dans la cavité. L'écoulement du rideau dans les fentes de la filière du couchage est considéré comme rectiligne [37]. Ce qui signifie que le champ de vitesse est effectivement rectiligne et homogène, autrement dit, qu'aucun gradient de vitesse n'est visible ni aucun changement de direction du rideau. Dans la section qui suit, une bibliographie sur l'analyse de l'écoulement interne est présentée.

2.6.2 Analyse de l'écoulement dans la cavité

Dans l'objectif d'identifier les causes de la non-uniformité du rideau pour plusieurs types de fluides et de conditions géométriques, plusieurs auteurs ont modélisé l'écoulement dans les cavités de la filière du couchage rideau. L'origine de la non-uniformité réside en la création d'un vortex ou tourbillon. La plupart des simulations numériques ont été réalisées en deux dimensions, soit 2D [40, 41] alors que l'écoulement du couchage rideau est un problème en trois dimensions, soit 3D et une analyse en 2D n'est pas entièrement suffisante pour comprendre le mécanisme de l'écoulement. Dans la littérature, peu de travaux de modélisation en 3D ont été réalisés. Certains chercheurs ont étudié l'uniformité de l'écoulement en 3D pour des filières d'extrusion [42]. Une analyse de l'écoulement par la méthode des volumes finis dans une filière de couchage avec différents fluides a été effectuée dans l'optique de modéliser l'écoulement dans la première cavité en 3D et l'écoulement dans la seconde cavité en 2D [37]. L'étude démontre l'utilité de la deuxième cavité pour les fluides et les conditions opératoires utilisés. Wen et Lin [43], puis Chang *et al.* [42] sont les premiers à prendre en compte l'effet des forces d'inertie. L'étude comprend une analyse et la simulation de l'écoulement du fluide polymère dans une filière d'extrusion avec une validation expérimentale. Un écoulement 3D des fluides en loi de

puissance avec la prise en compte de l'effet de la force d'inertie, de l'indice de puissance et de la géométrie de la cavité sur l'uniformité d'écoulement et sur la formation du vortex est étudié [30, 44]. La validation expérimentale du travail de modélisation en 3D se fonde sur une technique de visualisation de l'écoulement dans la filière d'extrusion [42]. La visualisation se concentre sur le calcul des champs de vitesse pour différents nombres de Reynolds et sur la prise et la comparaison des photos des lignes de courant. L'effet des forces d'inertie (ρQ) est représenté par le nombre de Reynolds ($Re = \frac{\rho Q}{\eta}$). La modélisation et la visualisation expérimentale de l'écoulement sont en accord, Elles montrent que même pour un faible nombre de Reynolds, un tourbillon peut néanmoins apparaître à l'entrée et que la taille du vortex augmente en fonction du nombre de Reynolds (Figure 2.14). L'effet d'un comportement rhéofluidifiant sur l'uniformité de l'écoulement est étudié par Wen *et al.* [43], L'étude montre que l'uniformité se déstabilise avec la diminution de l'indice de la loi de puissance du fluide étudié et que le débit est maximal au niveau du centre de la filière.

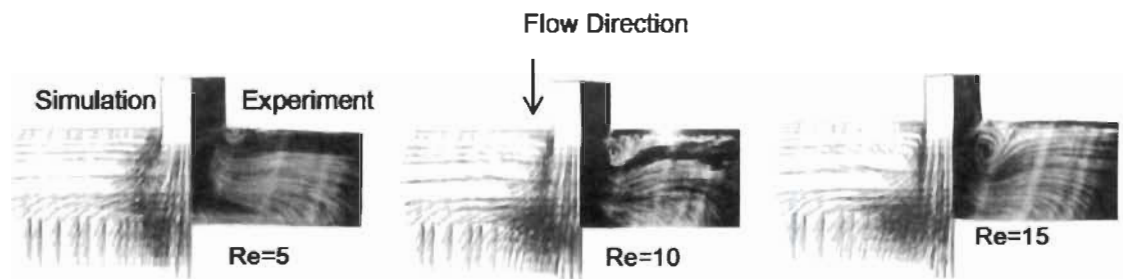


Figure 2.14 Effet du nombre de Reynolds et comparaison des résultats de la modélisation avec la visualisation expérimentale de l'écoulement pour un fluide newtonien [42]

Les études préalables sur l'écoulement interne d'une coucheuse rideau ont permis de mettre de l'avant l'importance de la géométrie de la coucheuse (cavitation), de la rhéologie et du nombre de Reynolds sur l'écoulement interne des saucés de couchage. Les éléments précédents devront donc être pris en compte pour une étude de l'écoulement dans l'HydraSizerTM.

2.7 Écoulement externe du rideau

Les données expérimentales obtenues sur les coucheuses rideaux contribuent à améliorer le savoir-faire du couchage mais les essais sont coûteux et nécessitent du temps de développement. La modélisation du couchage rideau contribue à réduire les coûts de développement de la coucheuse rideau et aide à élucider les corrélations entre les paramètres du procédé et la qualité du couchage. La section suivante traite des divers travaux de modélisation sur l'écoulement externe du rideau. Les travaux de Dyson [45] et Brown [30] y sont présentés. L'objectif est de montrer qu'une modélisation analytique, soit résoudre de façon mathématique les équations, est possible pour l'écoulement externe du rideau et de sélectionner parmi les éléments utilisés de modélisation analytique, ceux qui seront retenus pour la modélisation de l'écoulement externe du rideau à base de MNFC.

2.7.1 Modèle de Dyson

Dyson *et al.*[45] ont proposé un modèle mathématique simple pour décrire l'écoulement externe du fluide dans le procédé du couchage rideau. Le modèle est basé sur un faible ratio d'aspect, *i.e.* le rapport de la longueur du rideau par la largeur de la fente. La modélisation montre que le fluide est en chute libre, à l'exception d'une région proche du substrat.

Le modèle est exploité pour des grands nombres de Reynolds en conditions industrielles. Dyson effectue une modélisation à l'état stationnaire en dérivant les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement et en supposant que le fluide est incompressible. Le système de coordonnées utilisé est basé sur la méthode de la longueur d'arc. Le ratio d'aspect ou le facteur de forme $\varepsilon = h/l$, avec h est l'épaisseur du rideau (largeur de la fente), et l représente la longueur du rideau qui est supposé petit dans tous les régimes de fonctionnement. En outre, et en analogie avec les travaux de Trouton pour un écoulement visqueux extensionnel, Dyson *et al.* Supposent un écoulement uniforme à travers l'épaisseur du rideau. Le rideau est modélisé de la manière la plus simple en

considérant une coupe transversale à travers le plan normal au substrat, loin de tous les effets de bord. Les coordonnées sont indiquées à la Figure 2.15.

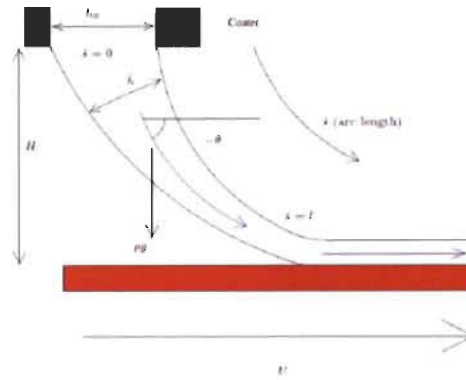


Figure 2.15 Les coordonnées du rideau [45]

Le modèle proposé pour l'écoulement du rideau à l'état stationnaire est résolu dans le régime dominé par l'inertie pour une application industrielle. Le modèle n'autorise pas la description du contact du rideau avec le papier. Le problème est relié à l'hypothèse d'une rhéologie newtonienne simple. L'incorporation des effets viscoélastiques demeure une solution pour remédier à la question d'instabilité (inclusion des modèles non newtoniens, viscosité extensionnelle...). Les données expérimentales obtenues sur les coucheuses rideaux contribuent à améliorer le savoir-faire du couchage mais les essais restent coûteux et nécessitent un temps de développement. La modélisation du couchage rideau contribue à réduire les coûts de développement de la coucheuse rideau et aide à clarifier les corrélations entre les paramètres du procédé et la qualité du couchage.

2.7.2 Modèle de Brown

Brown *et al.*[30] ont étudié l'écoulement fluide en couchage rideau. Leur étude est considérée comme une introduction essentiellement expérimentale à la dynamique du rideau tombant. L'étude comprend également un appendice mathématique par GI Taylor pour décrire la dérivation de l'équation du mouvement où il est montré empiriquement que le rideau est en chute libre. Des analyses théoriques et expérimentales de la stabilité du rideau ont été effectuées par Brown *et al.* [30] et par Lin *et al.* [46]. Ils trouvent que le rideau est stable dans le cas où les perturbations sont "balayées" en aval avant qu'ils n'aient la chance de se développer. Cela équivaut mathématiquement à la condition où le nombre

de Weber, qui représente un équilibre entre l'inertie et les forces de tension de surface, est supérieur à 2, tel que cité précédemment.

Il n'y a pas un lien entre le modèle de Brown et le modèle de Dyson. Le point fort du modèle de Brown est qu'il est expérimental et théorique à la fois au contraire du modèle de Dyson qui est purement théorique. Le point faible du modèle de Dyson est qu'il est aussi basé sur l'hypothèse d'un fluide newtonien. Le modèle de Brown est plus proche de notre cas car il prend en considération les modèles non newtoniens et les variations de la viscosité.

2.8 Conclusion

La revue de la littérature a en premier lieu permis de présenter une étude sur a) les micro-nano fibrilles de cellulose en fonction des procédés de fabrication, ainsi que les propriétés de la MNFC b) couchage rideau et sur les défauts pouvant être rencontrés lors du procédé. Une mise en évidence de l'influence des paramètres rhéologiques et de la physique du rideau sur l'écoulement du rideau a été présentée. La qualité du couchage dépend donc fortement de la rhéologie de la sauce utilisée mais aussi de la tension de surface, de la géométrie interne du dispositif et des conditions opératoires telles que le débit et la géométrie de la coucheuse.

L'écoulement rideau est un écoulement complexe. Pour réduire le niveau de complexité, l'étude de l'écoulement interne et externe présente une opportunité permettant de mieux appréhender les paramètres clés qui gouvernent le couchage rideau. La distribution de l'écoulement à travers une cavité interne d'une filière de couchage rideau est le résultat de l'interaction entre la géométrie de la filière, les forces visqueuses, inertielles et gravitationnelles du liquide. Dans la cavité, les forces visqueuses, inertielles et gravitationnelles dominent. Dans la fente, seules les forces visqueuses dominent. Afin de mieux comprendre ces écoulements, nous devons combiner les principes de conservation de masse, de quantité de mouvement et des conditions aux limites associées.

La conception de la cavité couchage rideau varie en fonction de l'application prévue de la filière. Par exemple, une forme en T de la cavité convient à une large gamme de fluides,

mais peut entraîner un temps de séjour excessif des fluides, ce qui peut entraîner une sédimentation. Il existe peu d'informations sur l'écoulement tridimensionnel dans la cavité et la plupart des travaux question ont négligé la force d'inertie car ils concernaient les filières d'extrusion. Néanmoins, le travail initial sur les simulations en trois dimensions par éléments finis a été réalisé; les résultats de la simulation ont montré que l'indice de loi de puissance et le nombre de Reynolds affectent grandement la distribution de l'écoulement.

L'analyse interne permet de comprendre l'effet de la géométrie de la coucheuse utilisée, les propriétés des fluides utilisés tandis que l'analyse de l'écoulement externe vise à comprendre dans quelles conditions opératoires des perturbations pourraient se développer pour un couchage avec une seule couche et aussi de créer des corrélations entre les paramètres de fonctionnement. La suite du document présente un chapitre sur la description du protocole expérimental et des approches qui seront utilisées dans le travail de thèse.

Chapitre 3 - Matériels et méthodes

L'utilisation des sauces en couchage rideau nécessite une bonne compréhension de leurs propriétés physiques et leurs effets sur l'écoulement du rideau à l'intérieur de la filière (ici c'est l'HydraSizer™) et aussi dans la zone de la chute libre du rideau avant d'entrer en contact avec le papier TMP. Une bonne optimisation du procédé permet d'obtenir un écoulement uniforme et stable et donc d'obtenir des meilleures propriétés barrières, mécaniques ainsi qu'une bonne qualité d'impression du papier structuré. Le projet de thèse cible principalement l'analyse physique des suspensions L-MNFC, leurs effets sur la qualité du rideau (stable ou non) et également cherche à comprendre le lien entre la stabilité de l'écoulement externe (stabilité du rideau) et l'uniformité de l'écoulement interne de la suspension L-MNFC. Le troisième chapitre est consacré à la présentation des matériels utilisés : les suspensions L-MNFC (L-MNFC et additifs), leur composition, ainsi que les méthodes proposées pour réaliser les caractérisations de leurs propriétés physiques et rhéologiques. Nous présentons ensuite les méthodes envisagées pour étudier l'effet des propriétés physiques intrinsèques des suspensions L-MNFC sur la stabilité du rideau. L'HydraSizer™ utilisé pour l'application de la L-MNFC sur le papier TMP au niveau de la machine à papier est présenté ainsi que le protocole suivi pour la réalisation de nos essais pilotes. Enfin, les méthodes de l'analyse de l'écoulement interne et externe des suspensions L-MNFC sont présentées.

3.1 Matériels

3.1.1 Micro nanocellulose fibrillée (MNFC)

La L-MNFC est produite par la compagnie OMYA International AG (numéro du produit VP-215900 NFC383). Les fibres de base sont des fibres de pâte kraft d'Eucalyptus blanchies qui sont broyées par un appareil Masuko en présence de carbonate de calcium. Le taux de matière sèche totale est d'environ 3.52% avec un rapport cellulose/carbonate de 80/20. Les caractéristiques de la MNFC sont illustrées sur le Tableau 3.1.

Tableau 3.1 Caractéristiques de la MNFC

	Teneur solide (%)	Teneur charges (%)	Teneur fibrilles (%)
L-MNFC	3.52	0.71	2.82

3.1.2 Dispersant / modificateur rhéologique (CMC)

Dans nos expériences, en fonction d'études précédentes de notre groupe de recherche, du carboxyméthyl-cellulose (CMC), un produit dérivé de la cellulose, sera utilisé comme agent dispersant. En couchage du papier, des CMC à basse viscosité sont souvent utilisés. La CMC est un excellent produit pour améliorer la rétention de l'eau. Il permet aussi d'obtenir une meilleure distribution du produit dans la couche appliquée. Le produit commercial FinnFix 10 de CP Kelco sera utilisé avec un degré de substitution (DS) de 0.8 et un poids moléculaire d'environ 60.000 g/mol.

3.1.3 Carbonate de calcium (CaCO_3)

Le carbonate de calcium utilisé pour préparer la solution de CMC+ CaCO_3 est fourni par OMYA International AG. Le numéro du produit est Hydrocarb 50-GU, broyé à sec et ne contenant pas de dispersants. Il s'agit du même carbonate de calcium utilisé dans le processus de broyage d'OMYA International AG pour fabriquer la MNFC.

3.1.4 Tensioactif (NIAPROOF)

En fonction de la revue bibliographique, le tensioactif proposé est le NIAPROOF de nature anionique, i.e. avec une partie hydrophile est chargée négativement. Il contient 27% en poids de sulfate de sodium et de tétradécyle et d'une concentration micellaire critique de 2.1 mM et d'une masse moléculaire de 316.4 g.mol⁻¹. Le NIAPROOF est un bon agent mouillant est destiné à des solutions contenant de faibles concentrations de matières solides dissoutes. Le NIAPROOF contient environ 26-28 % (en poids) de sulfate de tétradécyle de sodium (sel de sodium de sulfate de 7-éthyl-2-méthyl-4-undécanyle), 20 % (en poids) d'éther éthylique de diéthylène glycol et 1-2 % (en poids) de chlorure de sodium. La balance est de l'eau. Ce produit est le même tensioactif anionique sulfate

d'alkyl sodium que Union Carbide fabriquait auparavant sous le nom TERGITOL. Notre caractérisation des suspensions L-MNFC s'est effectuée sur la rhéométrie, la tensiométrie et la teneur en bulles d'air. La tensiométrie et la rhéologie sont deux méthodes essentielles pour déterminer la tension de surface et la viscosité de nos suspensions : deux importants éléments pour l'analyse du couchage rideau. La teneur en bulles d'air est un élément aussi important car elle peut affecter la rhéologie des suspensions de couchage, et donc la qualité du couchage. La teneur en bulles d'air dans les différentes suspensions MNFC est déterminée mais elle n'est pas incluse dans l'analyse de l'écoulement couchage rideau.

3.1.5 Rhéomètre

Les mesures rhéologiques sont effectuées sur un rhéomètre Rheologica Stresstech de la société ATS RheoSystems (Figure 3.1a)). Le fluide est placé entre un plan et un cône de rayon R comme illustré à la (Figure 3.1c). Il peut fonctionner soit à vitesse imposée soit à moment imposé. On peut soit imposer cette vitesse angulaire et mesurer le moment M du couple à appliquer pour qu'elle soit maintenue, soit appliquer un couple donné et mesurer la vitesse angulaire prise par le cylindre mobile. Le mode utilisé dans notre travail est le mode "vitesse imposée", La viscosité est déduite à partir de la mesure du moment et de la vitesse angulaire (la vitesse angulaire dans notre cas). La plaque utilisée pour les mesures est la P 20 (Figure 3.1b)).

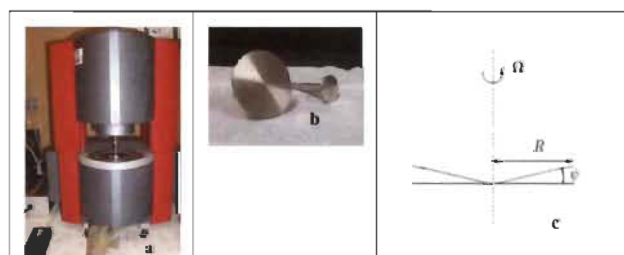


Figure 3.1 a) Rhéomètre Rheologica Stresstech; b) P 20 et P 40; c) Principe de fonctionnement

3.1.6 Viscosimètre

La viscosité des suspensions L-MNFC a été mesurée par un viscosimètre (VC) (modèle :A&D, VC-10) (Figure 3.2). La partie active du viscosimètre est une tige vibrante (Fréquence de 30 Hz) animée par une alimentation électrique constante. L'amplitude de la

vibration varie en fonction de la viscosité du fluide dans lequel la tige est immergée. La quantité minimale d'échantillon qui peut être analysée avec cet équipement est de 10 ml.



Figure 3.2 Viscosimètre (VC), A&D, VC-10

3.1.7 Tensiomètres

Les deux appareils sont utilisés pour la mesure de la tension de surface statique et dynamique. La différence entre les deux tensiomètres réside dans la méthode utilisée pour la mesure (en équilibre statique et dynamique) (voir la section méthodes). L'équilibre statique fait référence à un objet qui est en arrêt et qui ne bouge donc pas. Quant à lui, l'équilibre dynamique fait référence à des forces qui s'annulent oui, mais en présence sur un corps en mouvement.

Le tensiomètre qui a été utilisé pour mesurer les tensions de surfaces statiques de chaque suspension L-MNFC est de la marque KRUSS comme le montre la Figure 3.3. La suspension applique une force sur la plaque, ce qui permet donc la mesure de la tension de surface statique. La tension de surface statique est égale à la force appliquée par la plaque sur la suspension en équilibre hydrodynamique.



Figure 3.3 Tensiomètre KRUSS

Le tensiomètre dynamique à pression de bulle maximale est le choix idéal pour l'étude de la tension de surface dynamique des suspensions L-MNFC (Figure 3.4). Cet instrument

peut être utilisé seul ou via un ordinateur. Le logiciel permet la superposition de plusieurs résultats pour comparaison. Des temps d'adsorption aussi faibles que 0.1 milliseconde peuvent être étudiés. Des capillaires spéciaux sont disponibles pour des faibles volumes de bulle.



Figure 3.4 Tensiomètre dynamique

3.1.8 EGT

Le testeur de gaz entraîné (EGT) est utilisé (Figure 3.5). L'EGT utilise la loi de Boyle pour les gaz ($P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2$) pour déterminer la quantité d'air dans un échantillon. Une atmosphère de pression (environ 15 psi) est appliquée à l'échantillon en tournant un bouton sur l'EGT. La pression est indiquée par une bulle d'air emprisonnée dans l'indicateur de pression et une atmosphère est atteinte lorsque la bulle est réduite de moitié. En ce temps, il comprime de moitié le volume de tout l'air de l'échantillon. Étant donné que le volume total de la chambre d'échantillonnage est une constante connue, il n'y a qu'un simple pourcentage de facteur d'air pour chaque tour complet du bouton. En termes simples, une fois la pression atmosphérique appliquée, il suffit de compter le nombre de tours nécessaires pour ramener complètement le bouton. Ensuite, soustrayez un facteur de correction et multipliez-le par le pourcentage de facteur d'air pour obtenir la réponse finale en pourcentage d'air. L'utilisation de l'EGT peut nous donner une mesure des bulles d'air produites dans les suspensions L-MNFC lors de la préparation (mêmes conditions de préparation pour toutes les suspensions L-MNFC). Cette mesure peut aider à voir le lien entre la teneur en bulles d'air et les propriétés rhéologiques des suspensions L-MNFC.

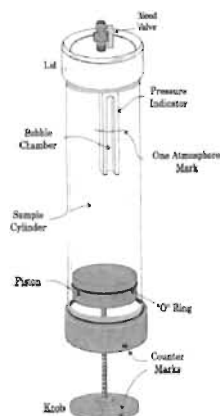


Figure 3.5 Testeur de gaz entraîné (EGT)

Les outils utilisés pour la caractérisation de nos suspensions L-MNFC sont cités, dans ce qui suit nous présentons les matériels pour analyser l'écoulement couchage rideau et la filière HydraSizer™ utilisée pour appliquer notre L-MNFC sur le papier au niveau de la machine à papier.

3.1.9 Logiciel CFD

ANSYS Fluent est un logiciel de simulation numérique qui contient des vastes capacités de modélisation physique nécessaires pour modéliser l'écoulement, la turbulence, le transfert de chaleur et les réactions pour les applications industrielles. Il est utilisé pour configurer et résoudre un problème CFD, puis visualiser les résultats dans ANSYS dans l'outil de post-traitement CFD-Post. Ce logiciel de simulation fournit les options d'analyse suivantes :

- Un système d'analyse de l'écoulement du fluide dans ANSYS Fluent Workbench.
- Création de la géométrie à l'aide de ANSYS DesignModeler.
- Création du maillage de calcul pour la géométrie avec ANSYS Meshing.
- Configuration de la simulation CFD dans ANSYS Fluent, qui comprend:
 - Définition des propriétés du matériau et des conditions aux limites.
 - Lancement du calcul (avec traçage du résiduel).

- Calcule de la solution à l'aide du solveur.
- Examen des champs de l'écoulement avec ANSYS Fluent et CFD-Post.

3.1.10 HydraSizer™

L'HydraSizer™ est un équipement pour couchage rideau conçu par GL&V. C'est une technologie qui sert à imprégner le papier ou le carton avec des additifs tels que l'amidon, ou d'autres particules dispersées mécaniquement et appliquées dans la partie humide de la machine à papier, pratiquement sur la table de formation. Des essais utilisant l'HydraSizer™ avec de l'amidon ont montré une augmentation des propriétés mécaniques de la feuille, telle la résistance à la traction, ainsi que des réductions significatives de la porosité. La Figure 3.6 présente une photo de l'HydraSizer™.



Figure 3.6 HydraSizer™ au I2E3

Pour assurer une reproductibilité acceptable de l'HydraSizer™, certains éléments clés de la géométrie interne de l'HydraSizer™ sont présentés ci-dessous. L'HydraSizer™ peut être divisé en deux parties. Une partie qui est équipée avec les tubes d'entrée et est appelée partie fixe (Figure 3.7a)). La partie du côté opposé est appelée la partie active qui est accessible pour contrôler et régler la fente de buse (Figure 3.7b)).

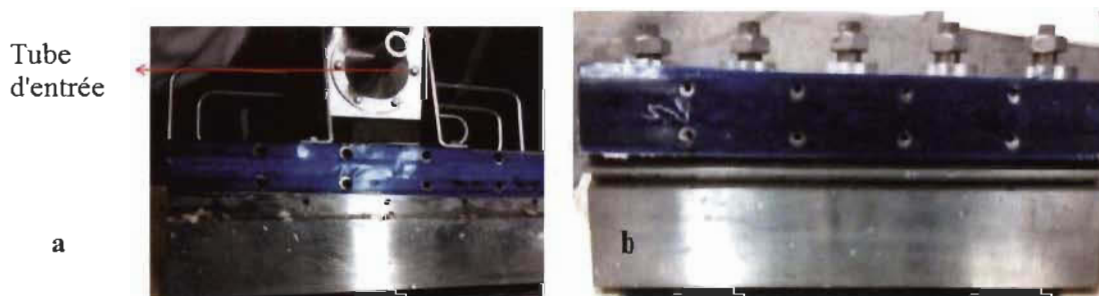


Figure 3.7 a) Partie fixe de l'HydraSizer™ ; b) Partie active de l'HydraSizer™

Le système d'essai hors ligne est constitué d'une pompe centrifuge relié avec l'HydraSizer™, entre lesquels une électrovanne est utilisée pour la régulation du débit de la suspension. La commande de puissance de la pompe est commandée par un tableau de bord et l'écartement des lèvres est fixé à 1.02 mm (constante pour tous les essais). Les paramètres géométriques de l'HydraSizer™, soient la longueur du collecteur ($L=508$ mm), rayon hydraulique de la section de la cavité ($R_h=1.32$ mm), section transversale de la cavité ($S=400$ mm²), périmètre de la cavité ($P=303.4$ mm) doivent être connus. La géométrie interne de l'HydraSizer™, les modèles rhéologiques des sauces de couchage sont des outils importants pour la modélisation de l'écoulement interne. Dans la section suivante, nous présentons l'ensemble des méthodes utilisées.

3.2 Méthodes

3.2.1 Composition des suspensions L-MNFC

L'effet de la carboxyméthylcellulose (CMC) et d'un tensioactif anionique (NIAPROOF) sur les propriétés physiques et la stabilité du rideau est examiné. Une solution de CMC à différentes concentrations (2%;4% et 6%) est utilisée pour les études expérimentales et pour l'analyse de l'écoulement (les concentrations de la CMC sont prises des travaux antérieurs de Fabrice Roussière et XIAOMAN XU). Le NIAPROOF est utilisé à très faible concentrations (0.01%;0.03% et 0.05%) pour éviter l'effet moussant (la concentration doit être inférieure à la concentration micellaire). Quatre types de suspensions L-MNFC (9 suspensions au total) sont utilisées pour examiner l'effet de la CMC, du tensioactif et l'effet combiné des deux modificateurs sur le couchage rideau. Les différentes suspensions L-MNFC sont présentées au (Tableau 3.2).

Tableau 3.2 Composition des suspensions L-MNFC

	Type#1	Type#2	Type#3	Type#4
L-MNFC	0.5%	0.5%	0.5%	0.5%
CMC	0%	(2%/4%/6%)	0%	(2%/6%)
NIAPROOF	0%	0%	(0.01%/0.03%/0.05%)	(0.01%/0.05%)

3.2.2 Caractérisation des suspensions L-MNFC

La caractérisation des suspensions L-MNFC comprend : une étude rhéologique qui vise à évaluer l'effet des additifs (CMC et tensioactif) sur la viscosité et le module élastique des suspensions, et, une mesure des tensions de surface (dynamique et statique). La mesure de la teneur en bulles d'air constitue un complément de la caractérisation car il est probable que le caractère viscoélastique soit en relation avec la quantité de l'air dans la suspension (la teneur en bulles d'air peut augmenter la viscosité et le module élastique des suspensions L-MNFC ?).

- **Mesure rhéologique des suspensions L-MNFC**

Pour toutes les mesures de la rhéologie, la plaque P20 est utilisée et l'écart est fixé à 1mm (essais préliminaires). Avant chaque mesure de rhéologie, 0.2 ml d'échantillon est déposé sur la plaque à l'aide de la seringue et laissé au repos pendant 10 minutes. Pendant la mesure, la température est contrôlée pour être constante à 21°C. Les propriétés rhéologiques des suspensions L-MNFC ont été déterminés en utilisant le rhéomètre Rheologica Stresstech de ATS Rheo-System. Nous avons mis en œuvre la procédure suivante (n'est pas une méthode standard) pour décrire complètement le comportement rhéologique des suspensions L-MNFC sous la contrainte de cisaillement :

- Les suspensions L-MNFC ont été préparées avec une agitation modérée pendant tous les essais.
- Une étape de conditionnement (21°C, taux de cisaillement 10 s^{-1}), suivie d'une rampe de cisaillement continue (21°C, 1 s^{-1} à 100 s^{-1}).

- **Teneur an bulles d'air dans les suspensions L-MNFC**

Une pression atmosphérique est appliquée à l'échantillon dans l'EGT en tournant le bouton. Une bulle d'air emprisonnée dans l'indicateur de pression indique la pression et la pression atmosphérique est atteinte lorsque la taille de la bulle est réduite de moitié. À ce stade, le volume de tout l'air de l'échantillon est comprimé en moitié. Étant donné que le volume total de l'échantillon est une constante connue, il n'y a qu'un simple pourcentage d'air pour chaque tour complet du bouton. En terme simple, une fois la pression

atmosphérique est atteinte, il suffit de compter le nombre de révolutions nécessaires pour que le bouton revienne à l'extérieur. Ensuite, nous soustrayons le facteur de correction et multiplions-le par le pourcentage de facteur d'air pour obtenir le résultat final en pourcentage d'air.

- **Tension de surface (statique et dynamique)**

Les mesures de la tension de surface peuvent être effectuées de manière dynamique ou statique. Les méthodes utilisées pour mesurer les tensions et leurs problèmes inhérents sont examinées ci-dessous. La mesure de la tension de surface statique est utilisée dans la partie dédiée à l'effet des propriétés des suspensions L-MNFC sur la stabilité du rideau.

- **Tension de surface statique- Méthode de la plaque Wilhelmy**

La plaque de Wilhelmy est l'une des méthodes les plus simples pour mesurer la tension de surface statique d'un fluide [47]. Dans cette méthode, une plaque très légère, reliée à un levier, est abaissée à la surface d'un liquide, jusqu'à ce qu'elle devienne en contact avec [47]. À ce stade, le liquide s'élève et forme un ménisque autour du périmètre de la plaque (Figure 3.8). La force exercée par le ménisque sur la plaque est donnée par l'équation 3.1 :

$$F = p\sigma\cos\theta \quad \text{Éq.3.1}$$

σ = Tension de surface de la suspension L-MNFC

p = Périmètre du bord de la plaque en contact avec la suspension

θ = Angle de contact

Bien que la méthode des plaques Wilhelmy soit une méthode très fiable pour déterminer la tension de surface de solutions à faible viscosité, elle est sujette à diverses erreurs lorsque les viscosités sont très élevées.

La mesure de la tension de surface statique va nous servir à savoir si les suspensions L-MNFC seront aptes à couvrir le papier par exemple (stabilité du rideau). Plus on diminue la tension de surface statique, plus le nombre de Weber est élevé d'où la stabilité augmente (théoriquement).

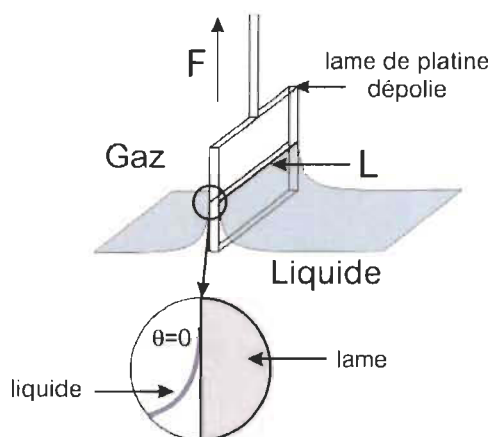


Figure 3.8 Principe de la méthode de Wilhelmy [48]

- **Tension de surface dynamique- Méthode de pression de bulle maximale**

Une autre méthode utilisée pour mesurer la tension de surface dynamique des suspensions L-MNFC est la méthode de la pression de bulle maximale [48](Figure 3.9). Dans cette méthode, de l'air est insufflé dans un liquide à travers un capillaire, formant des bulles à l'extrémité du capillaire. La pression à l'intérieur de la bulle augmente jusqu'à ce que la pression d'air et la pression de surface du ménisque liquide soient égales, comme régi par l'équation de Laplace ($P_2 - P_1 = 2\sigma/R$ avec P_2 est la pression du côté interne de la bulle, P_1 est la pression du côté externe, R le rayon de la bulle et σ est la tension de surface). Lorsque cette pression maximale est atteinte, la bulle grossit rapidement jusqu'à se détacher du capillaire, moment de chute de pression.

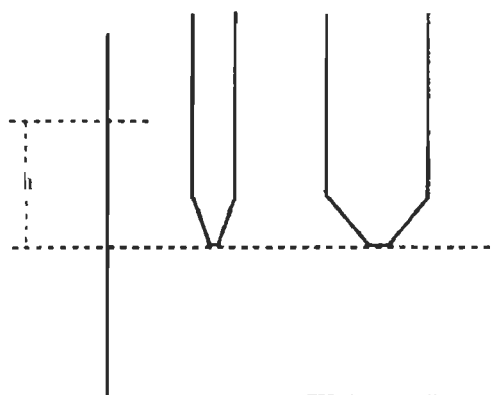


Figure 3.9 Méthode de pression maximale de bulle

Une fois la pression maximale déterminée, la tension de surface est calculée à l'aide des paramètres Garret et Ward [49] (équation 3.2)

$$\sigma = \left(\frac{\Delta P - \rho gh}{2} \right) R \quad \text{Éq. 3.2}$$

L'âge de la surface est déterminé par le temps qui sépare deux pics de pression successifs. En ajustant la pression atmosphérique, la fréquence de formation de bulles, inverse de l'âge en surface, peut être ajustée. L'interprétation de la tension de surface à différentes fréquences de bulle est complexe et est entachée d'imprécisions. En effet, le temps entre la pression maximale de bulle et le temps de détachement de la bulle, temps mort, n'est pas pris en compte dans l'âge de la surface, ce qui entraîne des données un peu erronées. Selon Ward et Garret [49], ce temps mort dépend de la tension de surface mesurée et du rayon du capillaire.

Cette méthode est également très sensible aux effets visqueux et à la contamination par les particules. Les composants de couchage tels que les pigments et les liant peuvent se déposer sur les parois capillaires, réduisant ainsi leur rayon effectif. Les suspensions L-MNFC ont été centrifugées et les tensions de surface dynamique et statique des surnageants ont été mesurées avec un tensiomètre à pression de bulle (pour la tension de surface dynamique) et un tensiomètre KRUSS (pour la tension de surface statique). Pendant les mesures, la température est contrôlée pour être constante à 25°C. La tension de surface est un facteur très important dans le couchage rideau, car le rideau peut être formé de manière stable si l'interface se dilate rapidement. L'âge de surface est le temps nécessaire pour que le rideau soit éjecté et s'échappe sur le substrat. Par conséquent, l'âge de surface dépend de la hauteur du rideau et la tension de surface à chaque hauteur est différente. Le tensiomètre à pression de bulle ajuste l'âge de surface en faisant varier le taux d'injection d'air dans le capillaire. Par exemple, si l'air est injecté rapidement et que le cycle de formation de bulles est court, l'âge de la surface est faible. Dans le procédé de la formation du rideau, plus la tension de surface est basse, meilleur est le résultat.

Après cette caractérisation, il est important de lier les propriétés physiques des suspensions L-MNFC au procédé couchage rideau et analyser leurs effets sur la stabilité du rideau L-MNFC. La mesure de la tension de surface dynamique sert à savoir la

variation de tension de surface à chaque âge de surface et donc nous pouvons savoir la tension du rideau à une hauteur donnée.

3.2.3 Effet des propriétés physiques mesurées sur la stabilité du rideau L-MNFC

Dans cette section, nous avons mesuré expérimentalement le débit minimal pour la formation du rideau pour un nombre de Reynolds donné, et nous avons tenté de clarifier les effets de la viscosité des suspensions L-MNFC, de la tension de surface et de la densité sur la limite de l'écoulement pour la formation du rideau (toutes les variables sont indépendantes). Nous avons également essayé de comprendre quels rapports de force sont importants pour former un rideau L-MNFC.

- **Méthode de mesure du débit minimal pour la formation du rideau**

Le débit minimal pour la formation du rideau que nous jugeons correspondre au débit moyen des trois débits (pour les 3 positions) et qui correspond pratiquement au débit juste avant la rupture du rideau, a été mesuré de la manière suivante (même méthode utilisée dans les essais hors ligne de l'HydraSizerTM avec une étape supplémentaire):

- Identification de 3 positions sur la longueur de l'Hydra-SizerTM;
- Mise en marche de l'Hydra-SizerTM et réglage de la vanne de recirculation;
- Utilisation d'un récipient pour peser le rideau dans chaque position en moins de 60 secondes;
- Calcul du débit moyen des trois débits (pour les 3 positions), ce débit est nommé débit minimal de la formation du rideau.

- **Méthode de mesure des propriétés physiques des suspensions L-MNFC**

Les suspensions L-MNFC à tester sont les mêmes suspensions utilisées dans la première partie. La tension de surface, la viscosité et la densité des suspensions ont été modifiées en modifiant la quantité de additifs (CMC et tensioactif NIAPROOF). La viscosité des suspensions a été mesurée par un le Viscosimètre (VC), A&D, VC-1 cité précédemment.

La tension de surface statique des suspensions L-MNFC a été mesurée par le tensiomètre KRUSS. La densité est aussi mesurée.

3.2.4 Écoulement interne : Maillage de l'HydraSizer™ et simulation

Les équations aux dérivées partielles qui régissent l'écoulement des suspensions L-MNFC ne se prêtent généralement pas aux solutions analytiques, sauf dans des cas très simples. Par conséquent, afin d'analyser les écoulements des suspensions L-MNFC, les domaines d'écoulement sont scindés en sous-domaines plus petits (constitués de primitives géométriques telles que les hexaèdres et les tétraèdres en 3D et les quadrilatères et les triangles en 2D). Les équations qui régissent l'écoulement sont ensuite discrétisées et résolues dans chacun de ces sous-domaines. Généralement, l'une des trois méthodes suivantes est utilisée pour résoudre le système d'équations qui régit l'écoulement: volumes finis, éléments finis ou différences finies. Il faut veiller à assurer une continuité de la solution à travers les interfaces communes entre deux sous-domaines, de manière à pouvoir regrouper les solutions approximatives à l'intérieur de différentes portions pour obtenir une image complète de l'écoulement des suspensions L-MNFC dans l'ensemble du domaine. Les sous-domaines sont souvent appelés éléments ou cellules, et la collection de tous les éléments ou cellules est appelée maille ou grille. La méthode fondamentale pour créer un modèle CFD peut être représentée comme un « pipeline » de six étapes, comme illustré à la Figure 3.10 ci-dessous. Le processus commence par la création de la géométrie qui est un assemblage d'une ou plusieurs pièces (formes géométriques) reflétant le dessin considéré. Étant donné que la CFD traite l'écoulement à travers ou autour des objets solides, le modèle CFD est construit sur l'inverse de l'assemblage et est appelé « Flow Volume Extract ». Cet extrait du volume de l'écoulement est maillé avec ANSYS Meshing et une simulation est ensuite réalisée avec des conditions limites avec ANSYS Fluent et les résultats de la simulation sont analysés.

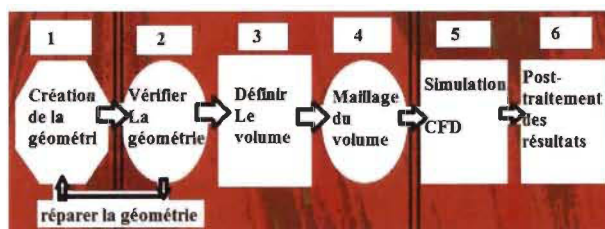


Figure 3.10 Principe fondamental d'un modèle CFD

Afin de simuler l'écoulement des suspensions L-MNFC dans la cavité de l'HydraSizer™, nous utilisons la conception créée avec DesignModeler avec quelques simplifications. Les logiciels de simulation reposent sur deux méthodes numériques principales: la méthode des éléments finis (MEF) et la méthode des volumes finis (MVF). Les deux méthodes impliquent de subdiviser le domaine de l'écoulement en un grand nombre d'éléments finis/volumes de contrôle, puis de résoudre les équations principales de l'écoulement des suspensions L-MNFC, c'est-à-dire les équations 3D de Navier-Stokes. Dans le processus, un système d'équations algébriques est formé et ensuite résolu par une méthode itérative. Les méthodes numériques diffèrent par leur dérivation et leur définition de ces équations algébriques. La (MVF) fournit des solutions discrètes, tandis que la (MEF) fournit une solution continue. La (MEF) utilise des fonctions simples par morceaux (par exemple, linéaire ou quadratique) pour décrire les variations locales des variables de inconnues de l'écoulement. Les équations de Navier-Stokes exigent une solution exacte. Si les fonctions d'approximation par morceaux sont substituées dans l'équation, la solution exacte n'est pas obtenue et un résidu est défini pour mesurer les erreurs. Les résidus sont ensuite minimisés dans un certain sens en les multipliant par un ensemble de fonctions de pesée et d'intégration. Pour la (MVF), une intégration formelle des équations de Navier-Stokes sur tous les volumes de contrôle du domaine de solution est réalisée. Dans notre cas, ANSYS Fluent utilise la (MVF), ce qui conduit à des solutions moins précises que la (MVF), avec une approximation d'ordre inférieur dans chaque cellule, mais la précision est suffisante avec un maillage approprié. Avec ANSYS Fluent, il est possible de simuler l'écoulement interne et externe en 2 ou 3 dimensions.

- **Création de la géométrie HydraSizer™**

Pour la géométrie de l'HydraSizer™ utilisée dans l'analyse de l'écoulement des suspensions L-MNFC, nous utilisons ANSYS DesignModeler et les dimensions sur les schémas de la conception de l'HydraSizer™ (Figure 3.11).

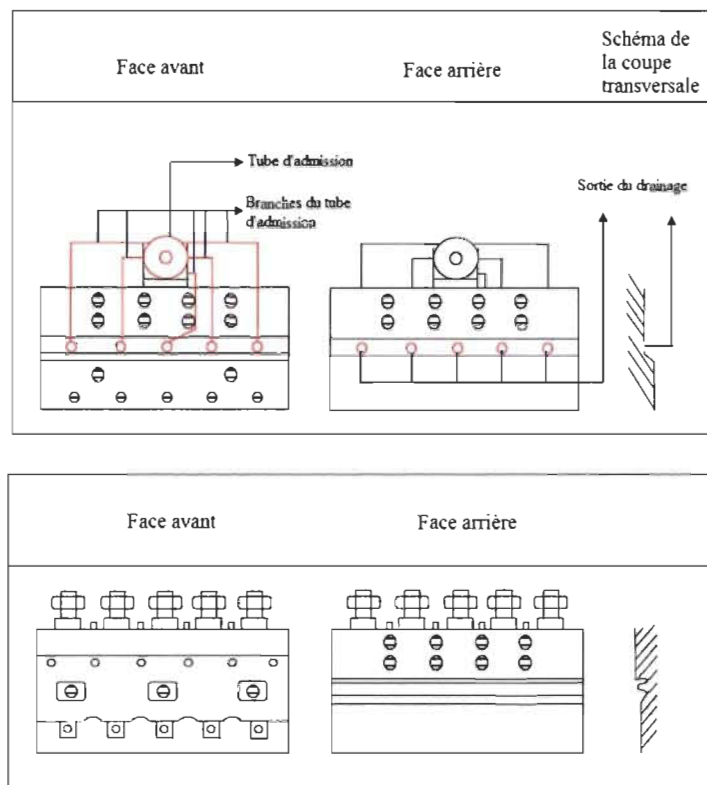


Figure 3.11 Schéma de l'HydraSizer™

- **Méthode du maillage**

Après la création de la géométrie de l'HydraSizer avec ANSYS DesignModeler, nous pouvons utiliser deux approches principales pour créer des maillages dans ANSYS Fluent Meshing :

- Générer un maillage de volume tétraédrique, hexa core ou hybride à partir d'un maillage existant. Dans ce cas, nous pouvons importer un maillage à partir d'ANSYS Meshing ou d'un package de génération de maillage tiers. Les maillages créés dans les packages CAD/CAE peuvent être importés ou convertis à l'aide des outils inclus.
- Générer un maillage de volume tétraédrique, hexa core ou hybride basé sur le maillage d'objets à partir d'une géométrie (format CAD ou au format (.tgf) de ANSYS Meshing). Dans ce cas, nous pouvons créer un maillage de surface connecté de manière conforme à l'aide des opérations d'habillage et de couture d'objet avant de générer le maillage de volume. Nous pouvons également utiliser le maillage « CutCell » pour créer directement un maillage de volume hexa pour

la géométrie (importée à partir de format CAD ou au format (.tgf) à partir de ANSYS Meshing).

Pour notre cas de figure, nous adoptons la technique « CutCell » pour générer un maillage de notre géométrie de l'HydraSizer™. L'application ANSYS Meshing nous permet de générer des maillages CutCell afin de réduire le temps nécessaire au maillage de géométries complexes. Cette fonctionnalité a été développée à l'origine pour ANSYS Fluent, mais elle est également compatible avec les applications « Polyflow ». Le maillage CutCell convertit un maillage de volume en un maillage à prédominance cartésienne (autrement dit, le maillage est composé principalement d'éléments hexaédriques, avec des faces alignées sur l'axe des coordonnées). Des éléments plus petits sont utilisés pour résoudre des détails complexes de la géométrie et les interfaces entre les différents éléments de taille sont non conformes. Pour utiliser la technique de maillage CutCell, nous procédons comme suit dans ANSYS Meshing :

- Sélectionner l'objet « Mesh » dans la boîte des commandes.
- Effectuer les opérations dans la Figure 3.12 :
 - Dans le groupe « Defaults », sélectionner CFD dans la liste de sélection « Physics Preference ».
 - Sélectionner « Polyflow » dans la liste de sélection « Solver Preference ».
 - Dans le groupe « Assembly Meshing », sélectionnez CutCell dans la liste de sélection « Method ».

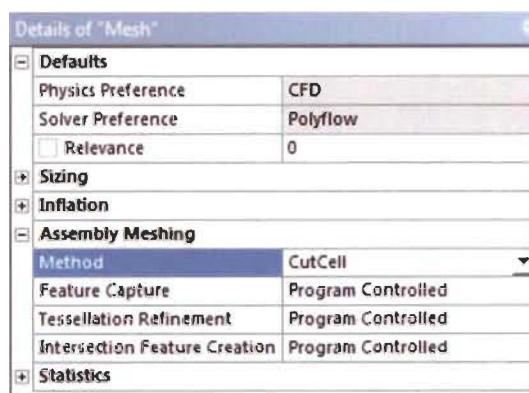


Figure 3.12 Détails pour CutCell Meshing

Nous décomposons le volume interne en plusieurs sous-volumes que nous maillons successivement. Une attention particulière est accordée au maillage afin de minimiser le temps de calcul et d'améliorer la précision. D'une part, le maillage doit être affiné pour augmenter la précision des résultats, mais d'autre part, il ne faut pas dépasser la capacité de la mémoire de l'ordinateur de calcul. C'est pourquoi nous avons pensé de ne simuler que la moitié de l'écoulement interne. Le temps de calcul et la mémoire utilisée pour le calcul seront ainsi divisés par deux. En effet, les coudes situant en amont de la cavité peuvent affecter l'écoulement à l'entrée de la cavité c'est pour cela nous pensons à simplifier la forme de la cavité de l'HydraSizerTM et considérer une seule entrée avec une cavité et une fente (Figure 3.13).



Figure 3.13 Forme de la cavité pour CFD

- **Solveur ANSYS Fluent**

Plusieurs hypothèses ont été formulées pour l'étude CFD de l'écoulement dynamique des suspensions L-MNFC avec le logiciel de simulation ANSYS Fluent. Nous avons considéré un état stable, avec un fluide isotherme et incompressible. Compte tenu des vitesses et des viscosités des suspensions L-MNFC, le régime d'écoulement peut être laminaire (nombre de Reynolds inférieur à 2000) ou turbulent (nombre de Reynolds supérieur à 2000). Les équations mathématiques qui décrivent l'écoulement interne sont basées sur les équations de Navier-Stokes et l'équation de continuité telles que trouvées dans la littérature. Il convient de noter que dans de nombreux articles, les auteurs n'utilisaient que la composant x parce que la variation axiale est généralement dominante pour l'écoulement dans la cavité, mais ce n'est pas le cas ici (on considère la cavité en x et y). Nous avons défini tous les murs sans condition de glissement et spécifié la vitesse à l'entrée et la pression à la sortie (fente). La pression de sortie à l'extrémité de la fente était la pression atmosphérique. Bien sûr, dans les conditions réelles, la pression est plus élevée, mais il n'y aura qu'un simple décalage. Puisque nous travaillons avec des fluides

incompressibles (la densité est constante et n'est pas liée à la température et la pression). Notre objectif était d'analyser l'effet des propriétés rhéologiques des suspensions L-MNFC sur l'écoulement à l'intérieur de l'HydraSizer™ (entrée + cavité + fente). Nous effectuons quelques simulations pour des suspensions L-MNFC (fluides non newtoniens). En plus du modèle du fluide réel, des modèles de fluides de loi de puissance ont été utilisés dans la simulation.

- Neufs suspensions L-MNFC sont proposées pour évaluer l'effet de la CMC (dispersant et modificateur de la viscosité) et du tensioactif (modificateur de la tension de surface) sur l'écoulement couchage rideau à l'intérieur de l'HydraSizer™. Nous déterminons leur comportement rhéologique et leurs propriétés rhéologiques et physiques (viscosité et tension de surface).
- Nous déterminons le modèle rhéologique (ou les modèles rhéologiques) des suspensions L-MNFC et puis nous déterminons les paramètres rhéologiques du modèle (des modèles) de chaque suspension L-MNFC.

Nous utilisons les paramètres (propriétés physiques et paramètres du modèle) dans nos simulations comme des paramètres d'entrée. Nous testons deux débits (50 et 70L/min) (les mêmes débits testés expérimentalement sur l'HydraSizer™). Deux possibilités sont disponibles pour la simulation avec le logiciel CFD: un écoulement stable et instable. La question est de savoir quelles informations supplémentaires ou quelle précision l'écoulement instable pourrait-il nous apporter ? Nous avons décidé de réaliser toutes nos simulations avec un débit constant car le débit est considéré comme constant dans le temps. Nous nous intéressons à l'influence de la rhéologie des suspensions L-MNFC sur l'uniformité de l'écoulement dans la cavité. Nous étudions l'effet de la viscosité, de la tension de surface (par l'ajout de la CMC, du tensioactif et des deux à la fois) et du débit sur l'écoulement interne des suspensions L-MNFC. En plus de l'étude numérique de l'uniformité de l'écoulement, une étude analytique est proposée pour comparer les résultats observés durant les simulations.

- **Étude analytique de l'écoulement des suspensions L-MNFC à l'intérieur de l'HydraSizer™**

- *Développement mathématique*

Afin de préciser quand les effets d'inertie et de gravitation sont importants pour l'écoulement des suspensions L-MNFC dans la cavité de l'HydraSizer™, Il est utile d'analyser l'écoulement des fluides en loi de puissance (cas des suspensions L-MNFC) qui traverse des matrices avec une section transversale constante de la cavité et une ouverture et une longueur de fente constantes. L'addition de l'équation 2.4 et de l'équation 2.6 et l'intégration du résultat sur la section transversale de l'HS™ donne l'équation 3.3 :

$$\rho \int \left(\frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} \right) dA = \int \left(\rho g_x - \frac{dP}{dx} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) dA \quad \text{Éq. 3.3}$$

En utilisant le théorème de divergence de la mécanique des fluides, l'équation 3.3 devient l'équation 3.4 :

$$\frac{\rho}{A} \int \frac{\partial u}{\partial x} dA = \rho g_x - \frac{dP}{dx} - \frac{1}{A} \oint \tau_{xn} ds \quad \text{Éq. 3.4}$$

La grandeur $\oint \tau_{xn} dS$ représente l'intégrale curviligne de la contrainte de cisaillement perpendiculaire à la paroi de la cavité prise autour du périmètre de la section transversale. Il est égal à la contrainte moyenne de cisaillement de la paroi multipliée par le périmètre.

$$\oint \tau_{xn} dS = \bar{\tau} P_e \quad \text{Éq. 3.5}$$

Le paramètre de forme inertiel peut être défini par l'équation 3.6 :

$$\alpha = \frac{1}{A} \int \frac{u^2}{\bar{u}^2} dA \quad \text{Éq. 3.6}$$

La substitution de l'équation 3.6 dans l'équation 3.4 donne :

$$\frac{dP}{dx} = - \frac{\rho}{A} \frac{d(A \bar{u}^2 \alpha)}{dx} + \rho g_x - \frac{\bar{\tau} P_e}{A} \quad \text{Éq. 3.7}$$

La contrainte moyenne de cisaillement sur la paroi peut être approximée par l'équation 3.8 pour un écoulement permanent. Ceci est cohérent avec l'approximation nécessaire pour obtenir l'équation 2.4 :

$$\bar{\tau} = \frac{\bar{\eta} Q N_{re} f P_e}{8 A^2} \quad \text{Éq. 3.8}$$

N_{re} est Le nombre de Reynolds multiplié par le facteur de friction d'un écoulement newtonien laminaire dans une conduite à section constante de la même section que la cavité de l'HSTM. Un bilan massique donne l'évolution du débit de la cavité en fonction du débit de la sortie de la fente (équation 3.9).

$$\frac{dQ}{dx} = -q \quad \text{Éq. 3.9}$$

Le débit à la sortie de la fente par unité de largeur est donné par

$$q = \frac{p H^3}{12 L \eta} \quad \text{Éq. 3.10} \quad \text{où } \bar{\gamma} = \frac{6q}{H^2}$$

Ces équations forment un système d'équations différentielles algébriques et ordinaires qui peuvent être résolus pour le profil de pression dans la cavité et la distribution d'écoulement interne. Les caractéristiques d'écoulement du fluide doivent être connues ainsi que la relation entre la contrainte moyenne et le taux de cisaillement moyen. Les effets de l'inertie et de l'orientation de la matrice par rapport à la gravité sont inclus, ainsi que les propriétés d'écoulement non newtoniennes. L'équation 3.11 représente le modèle rhéologique pour les fluides en loi de puissance.

$$\bar{\tau} = K \bar{\alpha} \bar{\gamma}^n \quad \text{Éq. 3.11}$$

$$a = \frac{\eta_0}{\gamma_0^{n-1}} \quad \text{Éq. 3.12}$$

Les équations (équation 3.7 et équation 3.9) sont combinées avec les équations (équation 3.8 et équation 3.10) et écrites pour des fluides en lois de la puissance (modèle réel et général des suspensions L-MNFC qui sont des fluides rhéofluidifiants), et exprimées en variables sans dimension. Nous obtenons le système d'équations différentielles suivant (équation 3.13 et équation 3.14):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dV}{dX} = -P^{1/n} \quad \text{Éq. 3.13} \\ \frac{dP}{dX} = N_g - N_m V \frac{dV}{dX} - N_v V^n \quad \text{Éq. 3.14} \end{array} \right.$$

Les variables sans dimension sont définies comme suit :

$$V = \frac{Q}{Q_0}; \quad X = \frac{x}{W}; \quad P = \frac{\Delta P_s H^{2n+1}}{2aLK_s} \left(\frac{W}{6Q_0} \right)^n$$

$$N_m = \frac{\rho \alpha Q_0^2 H^{2n+1}}{K_s a A L} \left(\frac{W}{6Q_0} \right)^n; \quad N_v = \frac{2WH^{2n+1}K_c}{DLK_s} \left(\frac{WR_e f}{12AD} \right)^n;$$

$$N_g = \frac{\rho g_x WH^{2n+1}}{2aK_s L} \left(\frac{W}{6Q_0} \right)^n$$

Q : débit dans la cavité;

Q_0 : débit à l'entrée; ΔP_s : pression dans la cavité; H : ouverture de la fente; a : paramètre de consistance; L : longueur de la fente; K_s : rapport de la contrainte de cisaillement à la contrainte de cisaillement au taux de cisaillement moyen de la fente; R_e : nombre de Reynolds

W : largeur de la filière; x : coordonnée (abscisse); f : facteur de friction; A : section transversale de la cavité; D : diamètre hydraulique; α : facteur de forme inertiel; n : indice de puissance.

L'uniformité de l'écoulement peut s'exprimer en fonction d'un indice largement utilisé dans les procédés du couchage rideau, il est exprimé comme suit (équation 3.15)

$$UI = \left[1 - \frac{[(1 + 0,05n)n\alpha L]^{\frac{n+1}{n}}}{(1 + 0,05n)(n+1)} \right]^n \quad \text{Éq. 3.15}$$

Où n est l'indice de la loi de puissance, L est la longueur de de l'HydraSizer™ de de l'alimentation à l'extrémité (fente), et α est un paramètre dépendant de la forme de la cavité. L'objectif de cette étude analytique est de quantifier l'effet inertiel, gravitationnel et visqueux pour la géométrie de l'HydraSizer™. La méthode suppose un écoulement visqueux et une approximation bidimensionnelle de l'écoulement dans la cavité. Pour les propriétés d'écoulement des suspensions L-MNFC, nous supposons que la viscosité est en fonction seulement du taux de cisaillement (la température peut aussi influencer la viscosité des suspensions L-MNFC) Dans le cas d'une géométrie constante de l'HydraSizer™ et des suspensions L-MNFC en loi de puissance, les trois nombres sans

dimension (N_m ; N_v ; et N_g) plus l'indice de loi de puissance sont les paramètres contrôlant l'uniformité de l'écoulement interne.

– *Méthode d'analyse*

Nous considérons un écoulement stable, laminaire et incompressible dans la cavité HSTM avec une surface de section transversale variable axialement. Les équations différentielles ordinaires obtenues peuvent être résolues pour le profil de pression dans la cavité et la distribution du débit dans l'HSTM. Ensuite, nous définissons d'indice d'uniformité d'écoulement interne et nous examinons l'effet visqueux sur l'écoulement interne des différentes suspensions L-MNFC (avec CMC et tensioactif) : Nous pouvons examiner l'uniformité de l'écoulement dans l'HS pour les suspensions MNFC sans effet inertiel et gravitationnel. Enfin, nous analysons et nous discutons les résultats. Une analyse de l'écoulement externe est aussi nécessaire.

3.2.5 Modélisation analytique de l'écoulement externe des suspensions L-MNFC

Les paramètres du couchage rideau avec l'HydraSizerTM peuvent être illustrés sur la Figure 3.14.

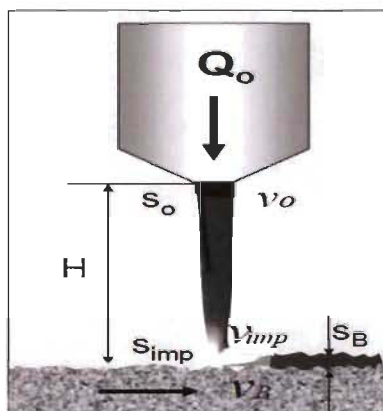


Figure 3.14 Paramètres du rideau

L'utilisateur de l'HydraSizerTM doit formuler son objectif en indiquant la vitesse du couchage requise V_B et le poids du couchage souhaité Δm ainsi que la teneur en solides K de la sauce du couchage (suspension L-MNFC). Le débit nécessaire Q_o pour former le rideau pourrait être calculé avec l'équation 3.16 :

$$Q_0 = S_B * V_B \quad \text{Éq. 3.16}$$

L'épaisseur S_B du film liquide appliqué sur la surface du papier TMP peut être déterminée avec la relation (équation 3.17) (A_m est le poids du couchage L-MNFC et K est l'indice de consistance) :

$$S_B = \frac{\Delta m}{K * \rho_{L-MNFC}} \quad \text{Éq. 3.17}$$

La vitesse de l'écoulement de la suspension L-MNFC (équation 3.18) dépend du débit Q_0 et de l'extension de la buse S_0 (surface de la fente).

$$V_0 = \frac{Q_0}{S_0} \quad \text{Éq. 3.18}$$

La gravité g accélère le mouvement descendant du rideau de la suspension L-MNFC. La viscosité et la tension de surface ralentissent la vitesse de la chute du rideau. Le calcul exact de la vitesse d'impact du rideau L-MNFC vers la bande de la machine à papier située à la distance H de l'HydraSizerTM, est compliqué. La vitesse d'impact V_{imp} peut être déterminée en utilisant l'équation 3.19 :

$$V_{imp} = V_0 + \sqrt{2 * (g - a) * H} \quad \text{Éq. 3.19}$$

Le retard a est en fonction de la viscosité et de la tension de la surface. L'équation 3.20 peut être utilisée pour des calculs approximatifs de la vitesse d'impact, car a est nettement inférieur à g .

$$V_{imp} = V_0 + \sqrt{2 * g * H} \quad \text{Éq. 3.20}$$

Pour comprendre le processus d'accélération du rideau et le développement de l'épaisseur du rideau, il est également nécessaire de déterminer l'épaisseur du rideau au niveau de la ligne d'impact. L'épaisseur de l'impact S_{imp} peut être déduite de l'équation 3.21. Cette équation représente la description mathématique de la loi de conservation de la masse.

$$Q_0 = V_0 * S_0 = V_h * S_h = V_{imp} * S_{imp} = V_B * S_B \quad \text{Éq. 3.21}$$

Nous supposons que la suspension L-MNFC est incompressible. Le produit de la vitesse moyenne V et de l'épaisseur moyen S du rideau est toujours constant pour chaque section

considérée du rideau. L'indice $_0$ caractérise la position à la sortie de l'HydraSizer, et l'indice $_h$ une section transversale du rideau L-MNFC à la distance h de la sortie de l'HydraSizerTM. L'indice $_{imp}$ indique la section transversale du rideau au niveau de la ligne d'impact et l'indice $_B$ celle au niveau du substrat.

$$S_{imp} = \frac{Q_0}{V_{imp}} \quad \text{Éq. 3.22}$$

Plus la distance h entre la sortie de l'HydraSizerTM et la section transversale du rideau est grande, plus la vitesse de chute du rideau est importante et simultanément, l'épaisseur du rideau est faible. Un étirement du rideau se produit à cause de l'accélération gravitationnelle. Cet étirement gravitationnel peut être calculé avec l'équation 3.23:

$$\chi_g = \frac{V_{imp}}{V_0} = \frac{S_0}{S_{imp}} \quad \text{Éq. 3.23}$$

L'étirement gravitationnel χ_g peut être influencé en modifiant la longueur du rideau H ou en ajustant l'ouverture de la fente S_0 de l'HydraSizerTM. χ_g peut également être modifié par la variation du débit de rideau Q_0 . Lorsque le rideau entre en contact avec le substrat, différents comportements et effets peuvent être observés en fonction de l'angle d'impact et de la vitesse du substrat. Si la vitesse du substrat est nulle, le rideau décélère, augmente son épaisseur et modifie le sens de l'écoulement au niveau de la ligne d'impact. Si l'angle d'impact est égal à 90 degrés. L'écoulement du rideau est divisé en deux écoulements équivalents avec des courants opposés. Lorsque la vitesse du substrat est différente de zéro, le comportement du rideau est défini par le niveau de la vitesse du substrat. Lorsque la vitesse du substrat est inférieure à la vitesse d'impact, l'épaisseur du rideau appliqué devient supérieure à l'épaisseur d'impact et une déformation de rideau se produit. Dans la plupart des cas, la vitesse du substrat est supérieure à la vitesse d'impact du rideau et par conséquent, une déformation en extension du rideau est induite. Pendant le transfert du couchage, la vitesse d'impact du rideau augmente jusqu'à la vitesse du substrat V_B en très peu de temps t . L'accélération du rideau a lieu sur la ligne d'impact dans les limites d'une courte distance L . La distance L requise pour cette accélération opérationnelle peut être déterminée au moyen de l'équation 3.24.

$$L = \frac{\sigma^* t}{\eta} \quad \text{Éq. 3.24}$$

Le temps t pour l'allongement du rideau peut être déduit de l'équation 3.25 :

$$t = \frac{S_B}{V_B} - \frac{S_{imp}}{V_{imp}} \quad \text{Éq. 3.25}$$

En raison de l'accélération opérationnelle, le rideau s'étire sur la ligne d'impact. L'étirement opérationnel χ_0 peut être calculé avec l'équation 3.26 :

$$\chi_0 = \frac{V_B}{V_{imp}} = \frac{S_{imp}}{S_B} \quad \text{Éq. 3.26}$$

L'étirement total χ_T du rideau résulte du produit mathématique de l'étirement opérationnel χ_0 et de l'étirement gravitationnel χ_g (équation 3.27).

$$\chi_T = \chi_0 * \chi_g \quad \text{Éq. 3.27}$$

La contrainte à laquelle le rideau L-MNFC doit résister pendant le processus de couchage dépend des facteurs d'étirement χ_g et χ_0 et est également fonction du rapport entre la variation de la vitesse du rideau et la variation de l'épaisseur du rideau. Le taux d'étirement γ peut donc être définie selon l'équation 3.28 comme le rapport entre la variation de la vitesse du rideau et la variation de l'épaisseur du rideau au niveau de la ligne d'impact. Le taux d'étirement γ décrit le processus d'élongation du rideau au niveau de la ligne d'impact. Le facteur γ intègre deux processus indépendants: la cinématique du substrat et la cinématique du rideau de liquide.

$$\gamma = \frac{\Delta V}{\Delta S} = \frac{(V_B - V_{imp})}{(S_B - S_{imp})} \quad \text{Éq. 3.28}$$

Le facteur χ caractérise la diminution de l'épaisseur du rideau et le taux d'étirement γ décrit la vitesse avec laquelle l'épaisseur du rideau change. Si le facteur d'étirement χ et le taux d'étirement γ dépassent les valeurs critiques (χ_{crit} et γ_{crit}), des défauts de couchage apparaissent sur la surface du papier structuré en raison de l'étirement excessif du rideau. Les paramètres χ et γ peuvent être calculés sur la base des conditions de fonctionnement connues ou souhaitées. Une comparaison des valeurs calculées et critiques de χ et γ permet

une analyse et une évaluation de la faisabilité du couchage rideau pour différentes conditions de fonctionnement au niveau de l'HydraSizer™. Après la mise en équation des paramètres de l'écoulement externe. Nous procédons à une analyse basée sur le calcul de:

- L'étirement gravitationnel du rideau χ_g (influencé par la hauteur du rideau, l'ouverture de la lèvre ou débit du rideau) (pour les suspensions L-MNFC0.5%, M-CMC6, M-NIA0.05 et M-CMC6-NIA0.05)
- L'étirement opérationnel du rideau χ_o qui se produit à la ligne d'impact en raison de l'accélération opérationnelle (pour les mêmes suspensions)
- L'étirement total χ_T du rideau qui est le produit de l'étirement gravitationnel et de l'étirement opérationnel
- Le taux d'étirement du rideau des suspensions
- L'épaisseur du rideau dans la zone d'impact

Après les calculs, nous traçons les graphes des différents paramètres et nous analysons les résultats. En parallèle avec les analyses de l'écoulement interne et externe des suspensions L-MNFC, il est intéressant voir obligatoire de réaliser des essais expérimentaux sur l'HydraSizer pour tester la performance de cette filière et également la performance de la L-MNFC.

Nous proposons des essais Hors ligne et autres en ligne sur la machine à papier avec des suspensions L-MNFC et des suspensions M-CMC (L-MNFC avec CMC).

3.2.6 Essais HydraSizer™ (Essais hors ligne et en ligne)

- **Installation de l'Hydra-Sizer™**

Avant d'installer Hydra-Sizer™ dans la partie humide de la machine à papier, des tests hors ligne sont effectués avec un système d'installation en circuit d'eau fermé (Figure 3.15(a) et b)).

- **Mesure du débit du rideau**

La mesure du débit du rideau est effectuée à l'aide d'une vanne de recirculation qui permet de régler le taux de recirculation.

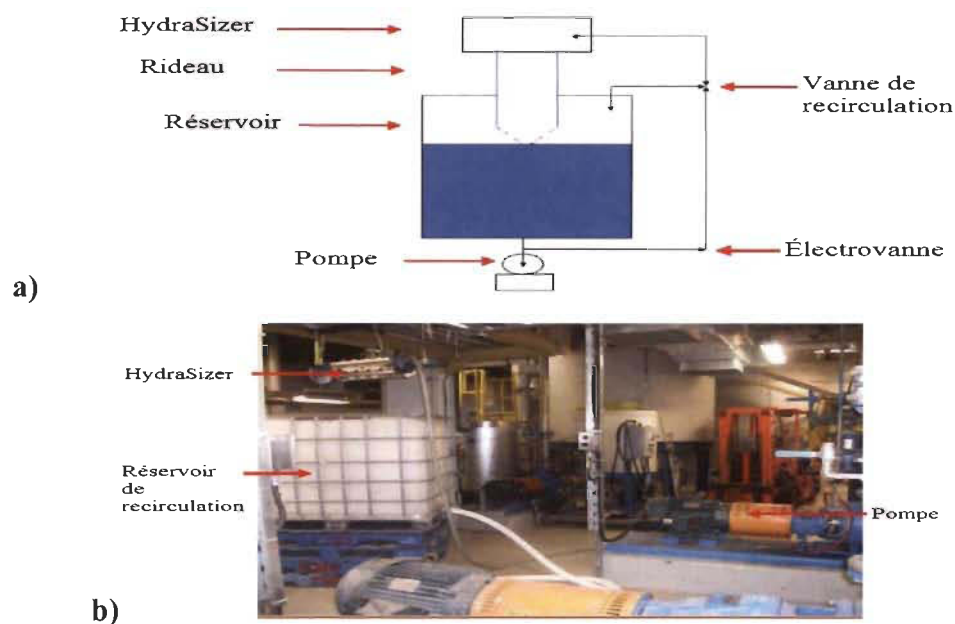


Figure 3.15 a) Schéma de l'Hydra-Sizer™ pour les tests hors ligne ; b) Hydra-Sizer™ avec un réservoir de recirculation

– *Méthode de mesure*

Les étapes de test du débit massique du rideau sont expliquées ci-dessous (Figure 3.16).

- a) Identification et étiquetage de 3 positions sur la longueur de l'Hydra-Sizer™ ;
- b) Mise en marche de l'Hydra-Sizer™ ;
- c) Réglage de la vanne de recirculation ;
- d) Utilisation d'un récipient pour peser l'eau dans chaque position en moins de 60 secondes ;
- e) Les débits massiques de l'eau sont mesurés dans différentes conditions de recirculation.

- f) La vanne de recirculation est maintenue ouverte pour un débit maximal possible. Initialement, les débits massiques de solutions de CMC (CMC utilisé en tant que modificateur de viscosité) sont mesurés. (Les concentrations de CMC sont de 1.9 ; 2.6; 3.4%)

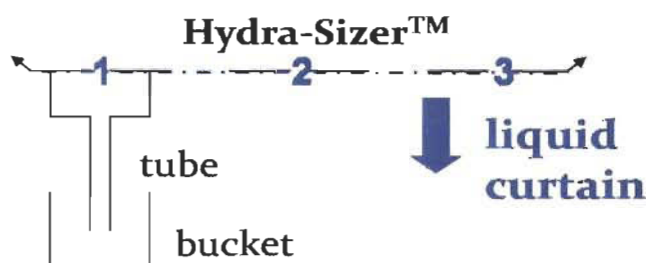


Figure 3.16 Méthode de test de la stabilité et de mesure du débit massique d'Hydra-Sizer™

Cette méthode vise à évaluer quantitativement le débit du rideau au niveau la fente. Les effets de la viscosité et de la tension de surface sur la stabilité du rideau peuvent être examinés.

- **La performance de la MNFC avec Hydra-Sizer™ hors ligne**

Outre la vanne de recirculation utilisée dans la mesure du débit massique du rideau, une électrovanne est installée pour contrôler les débits des suspensions MNFC en mode hors ligne. Tout d'abord, avant d'effectuer les mesures, l'espacement des buses est réglé à 1.02 mm le long de la sortie (largeur) de l'Hydra-Sizer™. Ensuite, quatre essais de différentes suspensions de MNFC à différents débits de sortie (Tableau 3.3) sont réalisés. Des photos de l'écoulement du rideau pour la performance de MNFC dans l'Hydra-Sizer™ sont prises et les débits massiques dans les trois positions le long de la sortie de l'Hydra-Sizer™ (Figure 3.16) sont mesurés.

Tableau 3.3 Essais de suspensions MNFC dans l'Hydra-Sizer™ hors ligne

Essai	Suspension	Débit (L/min)
1	MNFC 0.5%	50
2		70
3	MNFC 0.5%+ CMC 6%	50
4		70

- **Essais en ligne**

– Paramètres de la machine à papier

Les essais ont été réalisés à Innofibre (ancien CSPP). Leur équipement est une machine à papier complète (table de formation, presse, séchage et bobineuse) à l'échelle pilote. La feuille produite a une largeur de 455mm. Les paramètres définis sont:

- ✓ Pâte TMP de Produits Forestiers Résolu
- ✓ Poids de base visé : 60g/m^2
- ✓ Vitesse de la bande : 200m/min

– Paramètres de l'Hydra-SizerTM

- ✓ Ouverture du gap: 1.02 mm
- ✓ Système de pompage: centrifuge
- ✓ Débits: 50 et 70 L/min (contrôlé automatiquement par une électrovanne)

– Conception expérimentale

Une représentation des positions de l'HydraSizerTM est montrée sur la Figure 3.17:

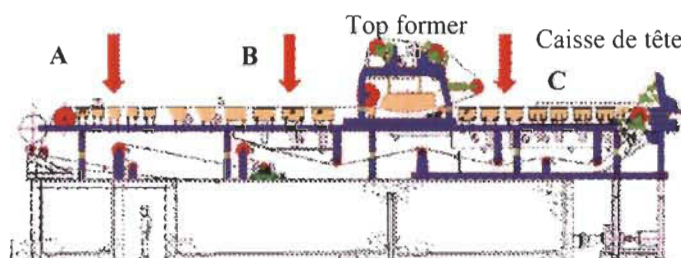


Figure 3.17 Schéma de la table Fourdrinier de la machine à papier pilote d'Innofibre avec les trois positions d'HydraSizerTM (A, B et C)

Les trois paramètres (position, composition et débit) ont été testés comme décrit dans le Tableau 3.4. Avec ces réglages, la couverture globale théorique serait de 2.8g/m^2 (2.2 g/m^2 de fibrilles et 0.6 g/m^2 de charges) à 50 L/min et 3.9 g/m^2 (3.1 g/m^2 de fibrilles et 0.8 g/m^2 de charges) à 70 L/min .

Tableau 3.4 Conception expérimentale des essais en ligne sur la machine à papier d'Innofibre

Numéro d'essai	Position de l'HydraSizer™	Composition de la suspension (%wt)	Débit (L/min)	Durée des essais (min)
1	Fin de la table fourdrinier (A)	0.5% L-MNFC	50	10
2			70	7
3		0.5% L-MNFC +6% CMC	50	10
4			70	7
5	Après le top former (B)	0.5% L-MNFC	50	10
6			70	7
7		0.5% L-MNFC +6% CMC	50	10
8			70	7
9	Avant le top former (C)	0.5% L-MNFC	50	10
10			70	7
11		0.5% L-MNFC +6% CMC	50	10
12			70	7

Chapitre 4 - Résultats et discussions

L'objectif final de ces travaux est d'explorer la dispersion des suspensions L-MNFC et leurs propriétés dans le couchage rideau. La CMC est choisie comme agent dispersant pour les fibres cellulosiques. L'utilisation du tensioactif a été reconnue comme une approche utile pour augmenter la stabilité du rideau, car une faible tension de surface dynamique est souhaitable pour obtenir un écoulement stable. La présente étude vise dans un premier temps à caractériser les suspensions L-MNFC par l'étude de l'effet des additifs sur les propriétés rhéologiques et physiques de la L-MNFC et ensuite analyser leur écoulement dans la filière HydraSizer™ et l'écoulement externe aussi. La compréhension de l'écoulement rideau nécessite une analyse basée sur une étude numérique et analytique. Par conséquent, l'influence de la CMC et du tensioactif sur la L-MNFC est étudiée ici en termes d'interactions fibrilles-fibrilles en suspension qui se base sur une mesure directe du niveau de la dispersion. Les deux perspectives fournies par la rhéologie et dans une moindre mesure par la tensiométrie, représentent respectivement l'écoulement des suspensions L-MNFC et pourraient être analysées/comprises en combinant des informations provenant de l'analyse CFD et de l'étude analytique de l'écoulement interne et externe respectivement. En effet, l'évaluation rhéologique est une méthode bien connue pour évaluer le modèle de la suspension L-MNFC et donc la nature de l'écoulement L-MNFC, tandis que la tensiométrie constitue une méthode d'évaluation de la stabilité du rideau. La combinaison de la dispersion et de la stabilité constitue un élément clé pour assurer un bon couchage rideau. Après la caractérisation rhéologique et la tensiométrie des suspensions L-MNFC, une analyse de l'effet de la CMC et du tensioactif sur la stabilité du rideau est réalisée. Cette partie est basée sur une mesure des propriétés physiques des suspensions et sur une corrélation entre ces propriétés et le nombre de Reynolds (nombre caractérisant de l'écoulement). L'interprétation de la stabilité rideau peut donner plusieurs explications vu la complexité du procédé couchage rideau. Dans notre projet, nous proposons de suivre l'écoulement au niveau de la cavité HydraSizer™. Nous voulons savoir est ce que la géométrie est bien compatible pour assurer un bon dépôt du rideau L-MNFC et aussi comment les propriétés des suspensions L-MNFC contrôlent l'écoulement L-MNFC. Pour ce faire, une analyse CFD est nécessaire. En outre, et vu que

l'écoulement externe est un écoulement en extension, il est intéressant de modéliser et de calculer les paramètres extensionnels du rideau L-MNFC. Les calculs visent à vérifier l'effet des paramètres de fonctionnement sur l'extension du rideau L-MNFC dans la zone d'impact avec le substrat et une fenêtre opérationnelle peut être déterminée en fonction des objectifs désirés.

Après les travaux de caractérisation et d'analyse d'écoulement interne et externe, nous proposons une démarche expérimentale pour vérifier la capacité des suspensions L-MNFC à former un rideau stable en utilisant l'HydraSizer™. Premièrement, la rentabilité de l'Hydra-Sizer™ est vérifiée en termes d'uniformité du débit et de l'effet de la CMC. Après quelques ajustements (mécaniques) pour assurer la meilleure efficacité de l'Hydra-Sizer™, la stabilité du rideau est analysée pour évaluer les performances des suspensions L-MNFC pour le procédé couchage rideau avec l'Hydra-Sizer™. Nous pensons qu'avec une bonne dispersion et une bonne capacité d'application du rideau L-MNFC, l'application des suspensions L-MNFC dans l'industrie papetière aura effectivement un bon impact sur le produit final. Enfin, une caractérisation du papier final est proposée pour valoriser l'ajout de la L-MNFC. Dans ce chapitre, les suspensions L-MNFC 0.5% + CMC0; 2; 4; 6% sont simplement appelées M-CMC;0; 2; 4; 6 et même choses pour les suspensions LMNFC avec NIAPROOF qui sont appelées M-NIA (L-MNFC avec NIAPROOF).

4.1 Caractérisations des suspensions L-MNFC

4.1.1 Rhéologie

Afin d'étudier l'écoulement dans le couchage rideau, nous devons décrire le comportement rhéologique des suspensions L-MNFC au cours du processus, depuis le réservoir de stockage jusqu'à la pompe, en passant par la filière du couchage rideau (HydraSizer™), puis en demeurant dans les cavités, avant de couler à l'extérieur en tombant sur le papier, puis se déposer à la surface du papier avant le séchage. Notre étude s'est concentrée sur l'écoulement à l'intérieur de la filière HydraSizer™ ainsi que l'écoulement externe. Nous avons donc analysé le comportement rhéologique des suspensions L-MNFC dans la plage de taux de cisaillement correspondant à ces parties du

processus. La plage d'utilisation de la tête de lecture du rhéomètre utilisé pour nos essais est comprise entre $3.7 \cdot 10^{-6}$ et 240 s^{-1} .

Les taux de cisaillement dans la cavité et la fente de l'HydraSizer™ ont été approximés à l'aide des équations :

$$\dot{\gamma}_s = \frac{6Q_0}{WH^2} \quad \text{Éq. 4.1}$$

$$\dot{\gamma}_c = \frac{2Q_0}{R_h A} \quad \text{Éq. 4.2}$$

Les dimensions de l'HydraSizer™ utilisés dans les équations (équation 4.1 et équation 4.2) sont citées dans le Tableau 4.1 ci-dessous :

Tableau 4.1 Caractéristiques de l'Hydrasizer™

Paramètres	Dimensions	Paramètres	Dimensions
Longueur de l'HS -L-	508 mm	Surface de la section transversale	400 mm ²
Rayon hydraulique de la section de la cavité -R _h -	1.32 mm	Périmètre de la cavité -P-	303.4 mm
Ouverture de la fente -H-	1.02 mm		

D'après nos calculs, les taux de cisaillement dans la cavité et dans la fente sont assez élevés que les taux de cisaillement dont nous disposons sur notre rhéomètre. Dans ce cas, nous réalisons nos essais et nous extrapolons pour les taux de cisaillements désirés (nous supposons que l'extrapolation est fiable).

Les tests rhéologiques sont utilisés ici pour explorer l'influence de la CMC et du tensioactif sur les caractéristiques rhéologiques et la structure interne des suspensions de la L-MNFC en tant qu'indication des interactions fibrilles-fibrilles.

Les résultats des courbes de la viscosité-taux de cisaillement, de la contrainte de cisaillement et du module élastique sont d'abord présentés afin de discuter de la dépendance du taux de cisaillement des suspensions L-MNFC ainsi que de leur structure.

- **Effet de la CMC**

Les résultats sont présentés sur la Figure 4.1 où les points représentent les essais expérimentaux, les résultats sont montrés sous formes des courbes de la viscosité-taux de

cisaillement, de la contrainte de cisaillement-taux de cisaillement et aussi celle du module élastique.

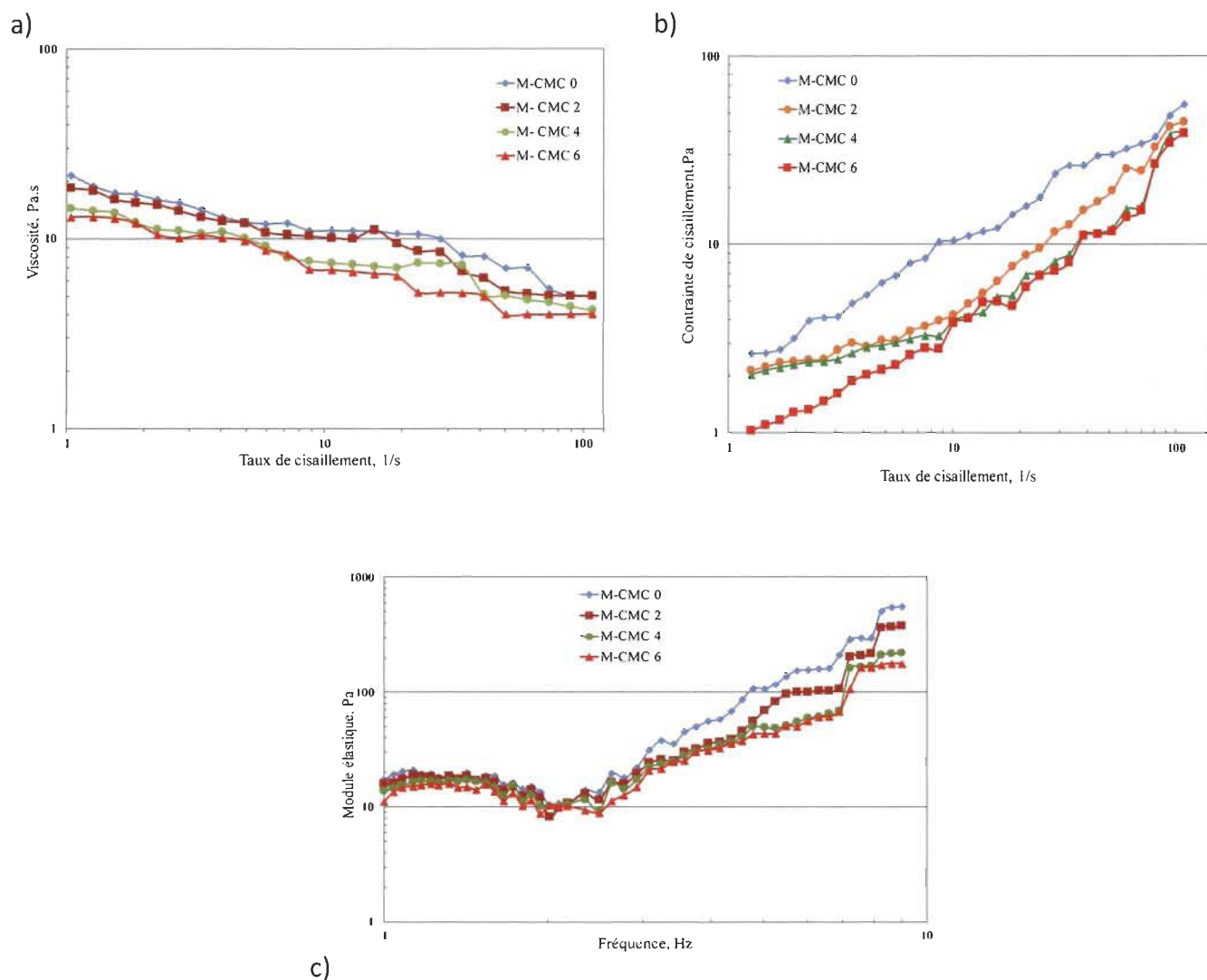


Figure 4.1 Courbes viscosité-taux de cisaillement, contrainte de cisaillement-taux de cisaillement et module élastique des suspensions L-MNFC en présence de la CMC

Sur la Figure 4.1a) et la Figure 4.1b), toutes les suspensions L-MNFC présentent un comportement rhéofluidifiant (la viscosité diminue lorsque du taux de cisaillement augmente et la contrainte du cisaillement augmente lorsque le taux de cisaillement augmente) [17]. Sans CMC, la L-MNFC présente la valeur de la viscosité la plus élevée. De plus, les suspensions L-MNFC présentent de légères perturbations à un taux de cisaillement compris entre 10 et 100 s^{-1} . Ces perturbations sont liées aux suspensions qui s'agglomèrent ou qui se dispersent pendant la mesure. L'addition de la CMC étant

comprise entre 2 et 6%, la proportion accrue de la CMC diminue la viscosité des suspensions L-MNFC mais des légères instabilités sont toujours présentes à des taux de cisaillements élevés.

Lorsque l'addition de CMC est augmentée à 6%, le comportement de la viscosité reste le même à faible taux de cisaillement, mais à des taux de cisaillement élevés (entre 50 et 100s^{-1}), la viscosité de la suspension L-MNFC devient presque constante. L'action de la CMC est un peu visible à partir de 2% mais est claire avec 6%. La CMC permet d'avoir une suspension L-MNFC plus homogène avec des courbes de rhéologie plus lisses. Nous interprétons les résultats rhéologiques obtenus pour les suspensions L-MNFC par la capacité de la CMC à prévenir les interactions fibrilles-fibrilles au sein de la structure interne de la L-MNFC. Ce phénomène est lié principalement au potentiel zêta qui présente les interactions (répulsion ou attraction) entre des particules en suspension dans un liquide. Une valeur élevée du potentiel zêta confère de la stabilité à une suspension, une valeur faible entraînera une agglomération ou floculation des particules en suspension. Le potentiel zêta des suspensions M-CMC (L-MNFC avec CMC) est élevé d'après l'étude de XIAOMAN XU (travail en parallèle avec la thèse) [17].

La CMC contribue à la répulsion des particules solides et donc affecte la morphologie des suspensions MNFC. Le module d'élasticité montre une tendance presque similaire avec la viscosité. Les suspensions L-MNFC à faible teneur en CMC (2%) montrent un module d'élasticité inférieur à celui d'une suspension sans CMC (Figure 4.1c). Cela s'explique par le fait que la CMC disperse la L-MNFC et l'empêche de former des flocs (le module d'élasticité représente la rigidité d'un matériau viscoélastique et donc sa diminution reflète la disparition des flocs qui confèrent de la rigidité aux suspensions MNFC). Cela signifie que la CMC diminue la rigidité de la L-MNFC et l'empêche de se comporter comme un gel (la diminution de la viscosité entraîne la diminution du module élastique (rigidité) des suspensions L-MNFC ce qui confirme la relation directe entre les trois figures de la (Figure 4.1). Les mêmes interprétations sont valables pour 4% et 6% CMC avec un effet clair de la CMC.

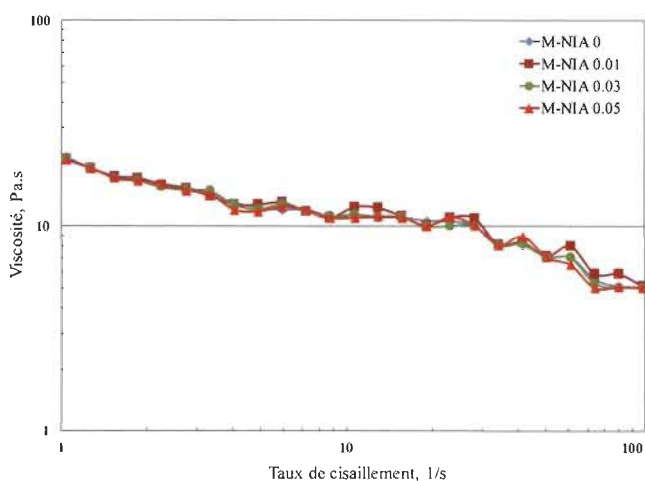
- **Effet du tensioactif anionique**

L'effet du tensioactif anionique (NIAPROOF) sur la rhéologie des suspensions L-MNFC est présenté sur la Figure 4.2. Nous observons que la quantité du tensioactif n'influence pas de manière visible la viscosité des suspensions L-MNFC. Le comportement rhéologique des suspensions L-MNFC est toujours rhéofluidifiant (Figure 4.2a) et (Figure 4.2b).

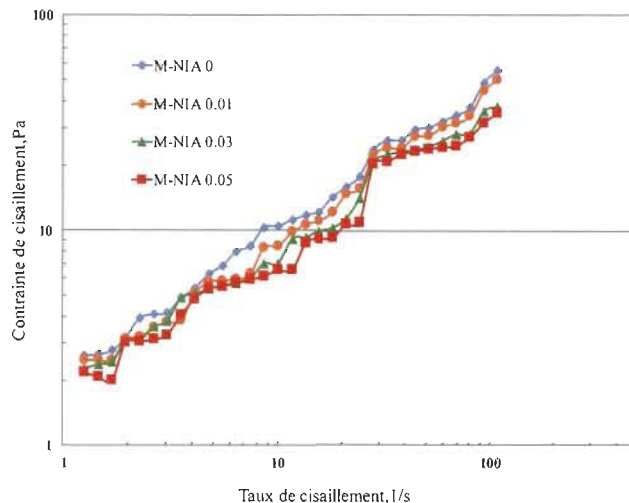
Comme l'addition du tensioactif va de 0.01% à 0.05% (les concentrations sont plus petites que la concentration micellaire du tensioactif qui est de 2.1mM), l'augmentation de la quantité du tensioactif contribue très légèrement à la diminution de la viscosité avec l'apparition de quelques légères instabilités à fort taux de cisaillement. Ceci peut être interprété par la faible interaction entre le tensioactif et les fibrilles de la L-MNFC (interaction de répulsion). Le module d'élasticité montre toujours une tendance similaire avec celle de la viscosité (Figure 4.2c)).

Les suspensions L-MNFC à faible teneur en tensioactif (0.01%; 0.03% et 0.05%) ont montré une légère diminution du module d'élasticité par rapport à la suspension L-MNFC sans tensioactif (la différence n'est pas significative) (Figure 4.2c)). Cela s'explique par le fait que le tensioactif disperse la L-MNFC mais avec un degré moindre que la CMC et empêche la formation des flocs. Cela signifie également que le tensioactif diminue la rigidité de la L-MNFC et l'empêche de se comporter comme un gel.

a)



b)



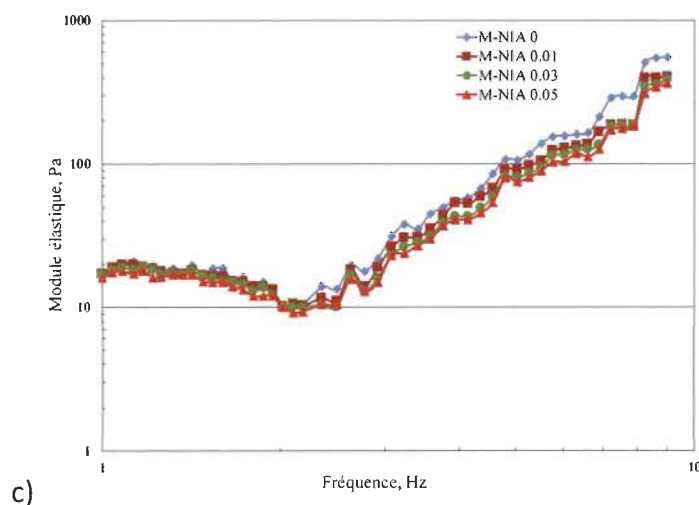


Figure 4.2 Courbes viscosité-taux de cisaillement, contrainte de cisaillement-taux de cisaillement et module élastique des suspensions L-MNFC en présence du tensioactif

- **Effet combiné de la CMC et du tensioactif anionique**

Dans le cas d'effet combiné du tensioactif et de la CMC, les deux suspensions L-MNFC ont un comportement rhéofluidifiant (Figure 4.3a) et Figure 4.3b)). L'action de la CMC reste visible même en mélange avec le tensioactif. L'addition de la CMC et du tensioactif (2 et 6% pour la CMC; 0.01% et 0.05% pour le tensioactif), la proportion accrue de la CMC et du tensioactif contribue à la diminution de la viscosité à faible taux de cisaillement mais toujours des légères instabilités à un taux de cisaillement élevé demeurent. Ceci confirme l'absence d'action du tensioactif sur la viscosité des suspensions L-MNFC indiquée dans la partie dédiée à l'effet du tensioactif. Le module d'élasticité montre une tendance similaire avec la viscosité. Les suspensions de MNFC à faible teneur en CMC et en tensioactif (2% et 0.01%) présentaient un module d'élasticité inférieur à celui d'une suspension pure de MNFC (Figure 4.3c)). La même tendance est observée avec les quantités de 0.05% du tensioactif et 6% de la CMC avec une diminution évidente du module d'élasticité. Cela s'explique par le fait que le CMC disperse le MNFC en présence du tensioactif et l'empêche de former des floes.

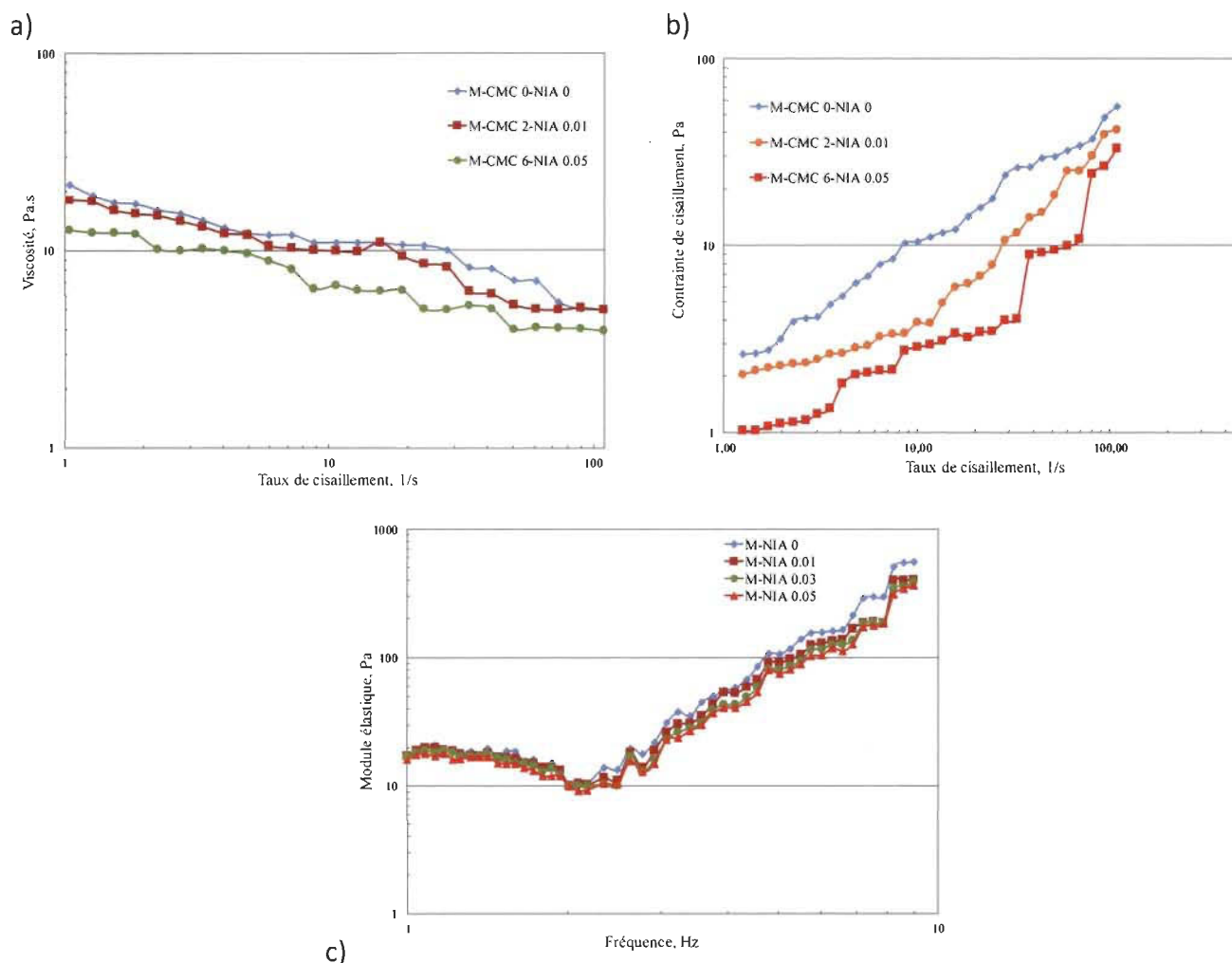


Figure 4.3 Courbes viscosité-taux de cisaillement a), contrainte de cisaillement-taux de cisaillement b) et module élastique c) des suspensions L-MNFC en présence de la CMC et du tensioactif

4.1.2 Tensiométrie

- **Effet de la CMC**

La teneur en CMC n'a pas eu d'effet considérable sur la tension de surface dynamique des suspensions L-MNFC (Figure 4.4) (les suspensions M-CMC (L-MNFC avec CMC) ont presque la même tension de surface dynamique que la suspension de la MNFC pure). Un âge de surface faible donnait une tension de surface élevée. La tension de surface dynamique de toutes les suspensions L-MNFC avec CMC (M-CMC0; M-CMC2; M-CMC4 et M-CMC6) à un faible âge de surface (ordre de 1s) est environ proche de la tension de surface de l'eau (≈ 72 mN/m à 25°C). En effet, au fur et à mesure que la teneur

en CMC dans les suspensions L-MNFC augmente, le phénomène d'épaississement du fluide ne s'intensifie (la pression au moment de la formation de la bulle reste quasi constante). En d'autres termes, les forces intermoléculaires entre la CMC, la L-MNFC et l'eau sont faibles (les forces de répulsions). Le potentiel d'interaction généré par ces forces intermoléculaires contribue à réduire l'énergie des fluides (tension de surface) et à les stabiliser. En général, la tension de surface dynamique des suspensions L-MNFC en présence de la CMC diminue avec l'âge de la surface : Cela conduit à dire que la tension de surface dynamique diminue avec une hauteur de rideau plus élevée, car une hauteur de rideau plus élevée augmente l'âge de la surface disponible.

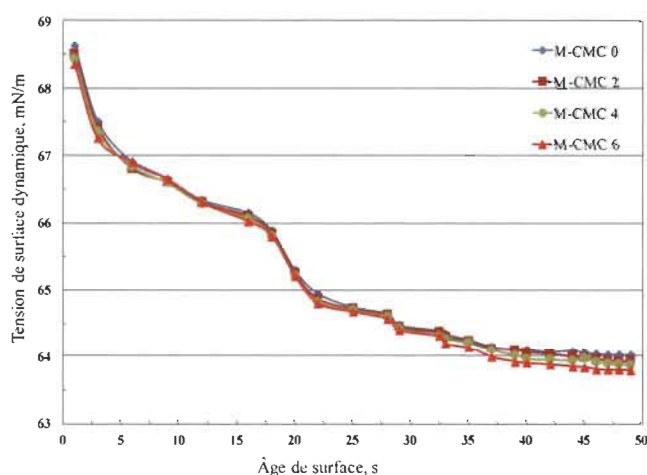


Figure 4.4 Effet de la CMC sur la tension de surface dynamique des suspensions L-MNFC

- **Effet du tensioactif anionique**

La teneur en tensioactif (NIAPROOF) a une influence significative sur la tension de surface dynamique des suspensions L-MNFC contrairement à la CMC (Figure 4.5). Même une petite quantité du tensioactif diminue considérablement la tension de surface.

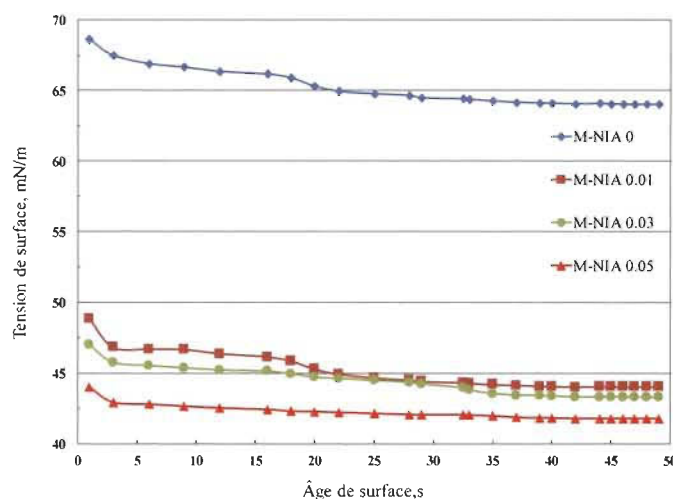


Figure 4.5 Effet du tensioactif sur la tension de surface des suspensions L-MNFC

Les mesures de la pression maximale de bulle ont montré que la tension de surface de toutes les suspensions L-MNFC diminuait avec un âge de surface faible, mais à des degrés différents. Cela peut s'expliquer par l'activité du tensioactif qui réduit la tension de surface des suspensions L-MNFC en raison de l'adsorption à la surface (interactions de Van Der Waals avec les fibrilles de la L-MNFC). Aux âges de surface élevés, la tension de surface reste presque constante. Ceci s'explique par le fait que la tension de surface effective des suspensions L-MNFC tend vers la tension de surface du tensioactif anionique à des âges de surface élevés.

- **Effet combiné de la CMC et du tensioactif anionique**

La teneur en CMC et en tensioactif a une influence significative sur la tension de surface dynamique des suspensions L-MNFC (Figure 4.6). La tension de surface des deux suspensions L-MNFC+ CMC+ Tensioactif (M-CMC 2-NIA 0.01 et M-CMC 6-NIA 0.05) diminue lorsque la concentration des deux constituants (tensioactif et CMC) augmente respectivement.

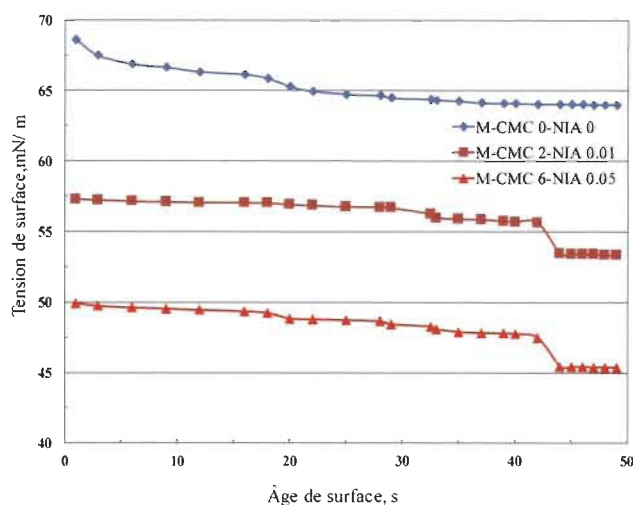


Figure 4.6 Effet combiné de la CMC et du tensioactif sur la tension de surface des suspensions L-MNFC

L'action du tensioactif reste visible même en mélange avec la CMC. Les mesures de la pression maximale de la bulle ont montré que la tension de surface des deux suspensions de MNFC diminuait avec un faible âge de surface (ceci est dû toujours à l'action du tensioactif). L'activité du tensioactif est évidente même en présence de la CMC. Aux âges de surface élevés, la tension de surface reste presque constante et tend vers la tension de surface du tensioactif anionique. On peut en déduire que même dans un mélange tertiaire (L-MNFC, CMC et tensioactif), l'action du tensioactif sur la tension de surface est nette mais diminue avec un degré inférieur à celui d'un mélange binaire (L-MNFC et tensioactif).

4.1.3 Teneur en bulles d'air

La suspension pure de la L-MNFC contient une faible teneur en air (moins de 1%). L'ajout de la CMC de 2 à 6% augmente légèrement la teneur en air (air dissout relié aux conditions de préparation des suspensions). D'autre part, l'ajout du tensioactif augmente de manière significative la teneur en air des suspensions L-MNFC (près de 3% pour 0.05% du NIAPROOF et 6% pour 0.05%) (toujours de l'air dissout). Lorsque la CMC était utilisée comme modificateur de rhéologie, des bulles d'air étaient générées dans des suspensions L-MNFC (air dissout) (Figure 4.7).

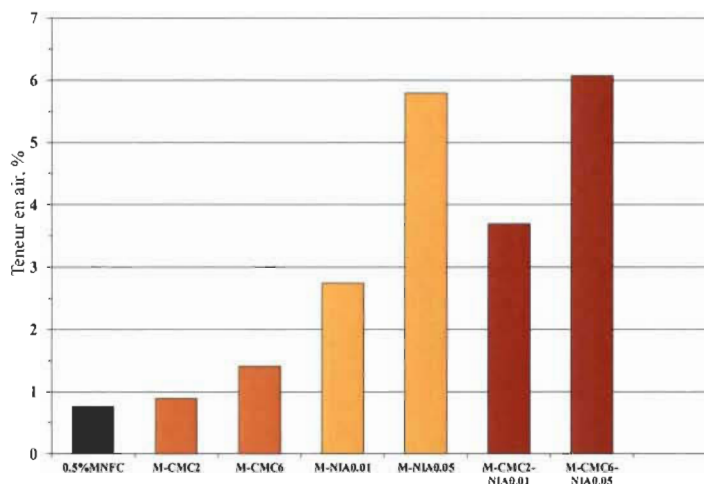


Figure 4.7 Teneur en bulles d'air des suspensions L-MNFC avec CMC et tensioactif

La quantité de bulles d'air augmente lorsque la teneur en CMC augmente. Le tensioactif génère plus de bulles d'air dans les suspensions L-MNFC que la CMC. L'utilisation des deux modificateurs génère encore plus de bulles d'air. Par conséquent, l'augmentation de la quantité du tensioactif augmente les bulles d'air dans les suspensions L-MNFC. Des modèles fluides sont attribués aux suspensions L-MNFC.

4.1.4 « Modèle fluide » des suspensions L-MNFC

En ce qui concerne les propriétés rhéologiques, il est à noter que les suspensions L-MNFC sont assez identiques car elles ont presque la même composition. La suspension L-MNFC pure présente une contrainte de cisaillement légèrement plus élevée que les autres suspensions. Compte tenu de l'évaluation approximative des taux de cisaillement dans la cavité et la fente de l'HydraSizerTM et aussi encore du comportement rhéologique constaté avec le rhéomètre, il est possible d'obtenir quelques premiers résultats sur la base de l'analyse de des figures (Figure 4.1; Figure 4.2 et Figure 4.3):

- Au niveau de la cavité et de la fente de l'HydraSizerTM, toutes les suspensions L-MNFC ont un comportement rhéologique similaire.
- Considérant la plage du taux de cisaillement explorée, toutes les suspensions L-MNFC seront modélisés comme des fluides de Herschel-Bulkley : modèle unique et général qui représente un comportement rhéofluidifiant (le comportement rhéofluidifiant est relevé à partir de l'étude rhéologique des suspensions L-MNFC).

Tableau 4.2 Paramètres des modèles rhéologiques des suspensions L-MNFC utilisées dans les essais

Suspensions L-MNFC	Paramètres rhéologiques	
	Indice de consistance (Pa.s ⁿ)	Indice d'écoulement
L-MNFC	2.06	0.68
M-CMC 2	1.19	0.69
M-CMC 4	1.2	0.72
M-CMC 6	0.68	0.76
M-NIA 0.01	1.75	0.69
M-NIA 0.03	1.84	0.71
M-NIA 0.05	1.84	0.73
M-CMC 2-NIA 0.01	1.1	0.69
M-CMC 6 –NIA 0.05	0.6	0.7

Les paramètres rhéologiques des modèles obtenus en ajustant au mieux les courbes expérimentales sont rassemblés dans le Tableau 4.2. Il convient de noter que le modèle de loi de puissance pour un fluide rhéofluidifiant (cas du modèle de Herschel-Bulkley) peut poser des problèmes dans certains cas avec la simulation numérique de l'écoulement d'une suspension L-MNFC, car la viscosité apparente n'est pas définie lorsque le taux de cisaillement tend vers zéro. L'identification du modèle que nous avons faite est suffisante pour les analyses d'écoulement que nous effectuons dans la présente étude, mais l'étude rhéologique devrait être achevée à l'avenir (inclure l'effet de la température sur la rhéologie, l'effet de l'air et valider l'hypothèse de l'extrapolation à taux de cisaillement élevé). Le même problème peut se poser pour la simulation de l'écoulement dans les fentes et les cavités utilisé pour les fluides avec une limite d'élasticité, mais il peut être surmonté de manière simple.

4.2 Effet des propriétés physiques des suspensions L-MNFC sur la stabilité du rideau

Dans cette section, nous avons mesuré expérimentalement le débit moyen pour la formation du rideau des suspensions M-CMC (L-MNFC avec CMC) ce débit est appelé débit minimal de la formation du rideau, et nous avons tenté de clarifier les effets de la viscosité du liquide, de la tension de surface et de la densité sur la limite de l'écoulement pour la formation du rideau. Dans un premier temps, nous avons examiné les suspensions

M-CMC et par le biais d'une analyse analytique qui relie le nombre Reynolds (Re) (nombre adimensionnel qui représentait l'écoulement) et le nombre des propriétés physiques qui peut se relier au nombre de (Re) pour décrire l'effet des propriétés physiques sur le débit minimal pour la formation du rideau ($Ka = \sigma \rho / g \mu^4$; σ est la tension de surface, μ est la viscosité). La tension de surface, la viscosité et la densité des suspensions L-MNFC ont été modifiées en modifiant la quantité des additifs (CMC et tensioactif). Le Tableau 4.3 montre la tension de surface, la viscosité et la densité de toutes les suspensions L-MNFC utilisées dans cette étude.

Tableau 4.3 Propriétés physiques des suspensions L-MNFC

Suspensions	Viscosité (Pa.s)	Tension de surface (mN/m)	Densité (Kg/m ³)
L-MNFC0.5%	12.5	66.83	1050
M-CMC2	8.22	67.28	1054
M-CMC4	8.01	67.85	1057
M-CMC6	7.56	68.29	1070
M-NIA0.01	12.33	59.85	1050
M-NIA0.03	11.55	53	1050
M-NIA0.05	11.04	47.01	1052
M-CMC2-NIA0.01	7.1	47.28	1058
M-CMC6-NIA0.05	7.02	42.45	1073

4.2.1 Débit minimal de la formation du rideau pour les suspensions L-MNFC avec CMC

La viscosité, la tension de surface et le débit minimal (débit volumétrique) de la formation du rideau pour les suspensions L-MNFC avec la CMC sont illustrés à la Figure 4.8. Pour $Q=50\text{L/min}$, Le débit minimal des suspensions M-CMC augmente légèrement avec la diminution de la viscosité et l'augmentation de la tension de surface des suspensions. En augmentant le débit d'alimentation à 70L/min , nous constatons que le débit minimal des suspensions L-MNFC est supérieur par rapport à $Q=50\text{L/min}$ (ce qui est évident) mais il augmente très légèrement pour toutes les suspensions M-CMC (augmentation non significative). La diminution de la viscosité et l'augmentation de la tension de surface statique des suspensions M-CMC signifie que la stabilité du rideau diminue car la viscosité est une force de résistance à la rupture du rideau tandis que la tension de surface est une force de rupture.

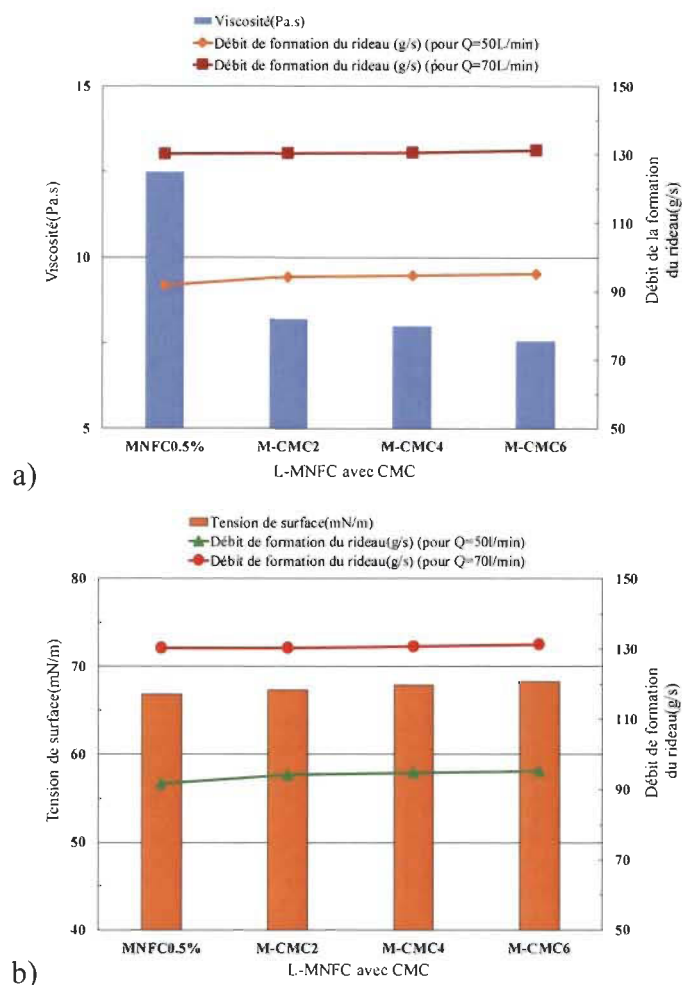


Figure 4.8 a) Viscosité et débit de formation du rideau pour les suspensions M-CMC b) Tension de surface et débit de formation du rideau des suspensions M-CMC

Le débit minimal pour la formation du rideau (pour les deux débits d'alimentation) était compris entre 91.83 et 131.17 (g/s). Dans l'expérience de Greiller, le nombre de Reynolds était compris entre 1 et 30, et dans l'expérience de Brown, le Re était entre 0.5 et 25. Nous pouvons souligner que cette étude a été menée à un nombre de Reynolds faible (au niveau de la fente vu l'ouverture qui est trop petite et la viscosité élevée des suspensions M-CMC). La relation entre la tension de surface des suspensions M-CMC et le débit minimal du rideau est illustrée à la Figure 4.9. Les données ont été recueillies à partir de la Figure 4.8b) et ont été réorganisées à la Figure 4.9. Le débit minimal augmente apparemment avec l'augmentation légère de la tension de surface statique des suspensions M-CMC (augmentation de la teneur en CMC).

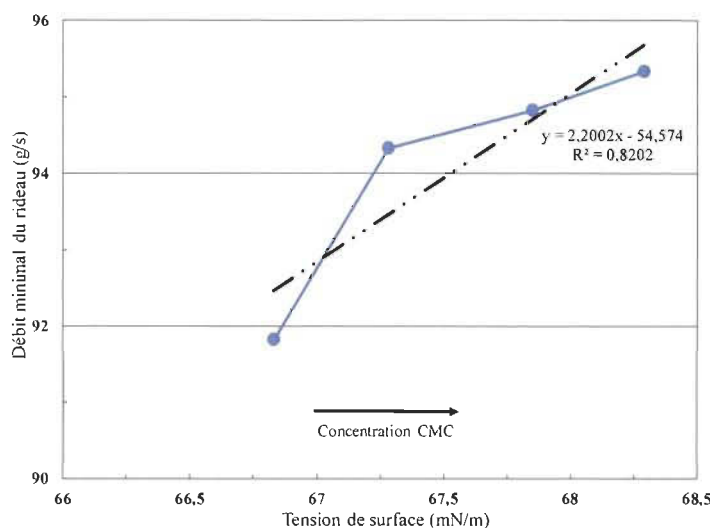


Figure 4.9 Effet de la tension de surface des suspensions M-CMC sur le débit minimal du rideau

Comme la force de rupture du rideau est principalement considérée comme une tension de surface, il est compréhensible que le rideau devienne plus stable lorsque la tension de surface des fluides diminue (augmentation du nombre de Weber cité précédemment). De plus, comme la viscosité est considérée comme une force de résistance à la rupture du rideau, il est raisonnable que le rideau devienne plus stable avec l'augmentation de la viscosité des suspensions fluides (suspensions M-CMC dans notre cas). Cependant, les résultats de Greiller ont montré qu'il existait une viscosité optimale en dessous de laquelle le rideau devenait instable. Nous pensions que les effets de bord ne sont pas des facteurs clés pour la stabilité du rideau dans la gamme de cette étude et que la zone de bord n'affectait pas la rupture du rideau, le rideau pouvait exister de manière stable même lorsque la suspension M-CMC avait une viscosité élevée.

Nous avons essayé de comprendre davantage les effets des propriétés des suspensions L-MNFC sur le débit minimal du rideau, et nous avons essayé d'exprimer les résultats sous une forme sans dimension. La relation entre les propriétés physiques des suspensions L-MNFC et le débit minimal pour du rideau (stabilité du rideau) a été analysée à l'aide du nombre de Reynolds (Re), qui représente le débit et le nombre de propriétés physiques (Ka), qui comprend la tension de surface, la viscosité et la densité. Ka et Re sont exprimés comme suit respectivement (équation 4.3 et équation 4.4):

$$Ka = \frac{\sigma^3 \rho}{g \mu^4} \quad \text{Éq. 4.3}$$

$$Re = \frac{\rho u d}{\mu} \quad \text{Éq. 4.4}$$

σ = Tension de surface de la suspension L-MNFC

μ = Viscosité de la suspension L-MNFC

g = Accélération gravitationnelle

ρ = Densité des suspensions L-MNFC

La Figure 4.10 montre la relation entre le nombre de Reynolds (Re) et le nombre des propriétés physiques (Ka) (et aussi le log (Re) en fonction du log (ka)) au débit minimal du rideau pour les suspensions L-MNFC. Le nombre de (Re) et le (Ka) ont une relation linéaire et nous avons obtenu les équations (équation 4.5 : pour Q=50L/min) et (équation 4.6 : pour Q=70L/min) au débit minimal pour la formation du rideau à partir de la Figure 4.10.

$$Re = 0,0023 Ka^{0,29} \quad \text{Éq. 4.5}$$

$$Re = 0,004 Ka^{0,26} \quad \text{Éq. 4.6}$$

À partir de l'équation 4.5 et l'équation 4.6, nous pouvons obtenir les équations (équation 4.7 : pour Q=50L/min) et (équation 4.8 : pour Q=70L/min) :

$$Q_{\min} = 0,5 * \mu^{-0,16} * \sigma^{0,86} * \rho^{0,29} \quad \text{Éq. 4.7}$$

$$Q_{\min} = \mu^{-0,04} * \sigma^{0,78} * \rho^{0,26} \quad \text{Éq. 4.8}$$

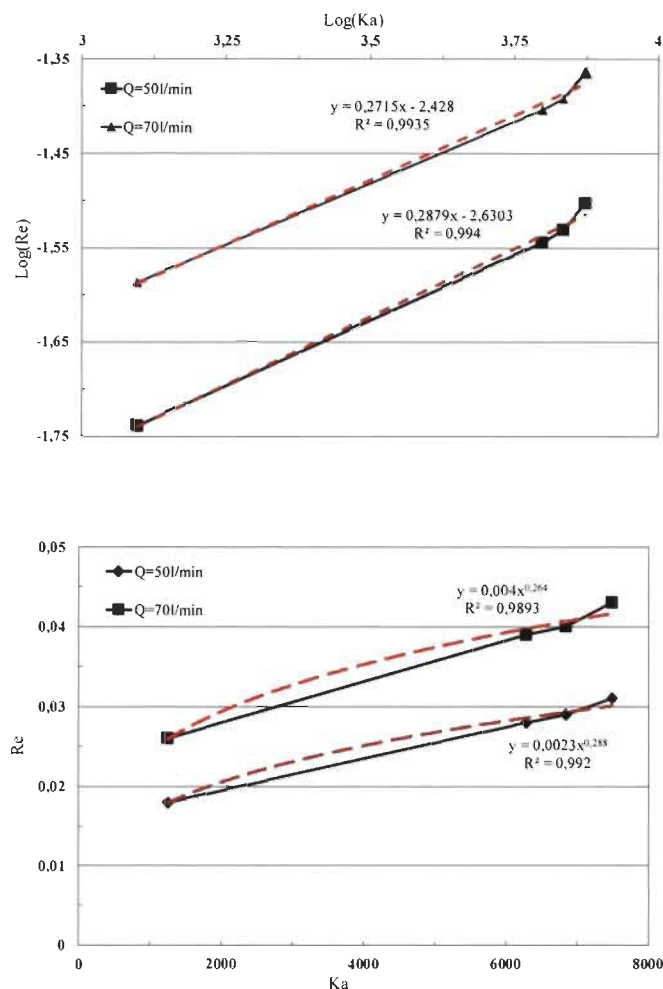


Figure 4.10 Relation entre le nombre de propriétés physiques (Ka) et le nombre de Reynolds (Re) pour les suspensions L-MNFC avec CMC

Q est le débit minimal (massique) du rideau. Q diminue avec la diminution de la tension de surface et de la densité et avec l'augmentation de la viscosité des suspensions L-MNFC. Il est compréhensible que la tension de surface ait le plus grand impact sur les propriétés des suspensions au débit minimal de la formation du rideau, car le rapport de la surface spécifique au volume de la suspension est grand dans l'intervalle des débits utilisés dans cette expérience. La Figure 4.11 montre la relation entre le débit minimal calculé Q_c en utilisant l'équation 4.7 et l'équation 4.8 et le débit minimal mesuré Q_m pour les suspensions M-CMC. Comme le montre la Figure 4.11, une bonne corrélation entre Q_c et Q_m est observée. Nous pensons que nous pouvons estimer le débit minimal de la formation du rideau par l'équation 4.7 et l'équation 4.8 pour les suspensions L-MNFC avec tensioactif et avec CMC et tensioactif.

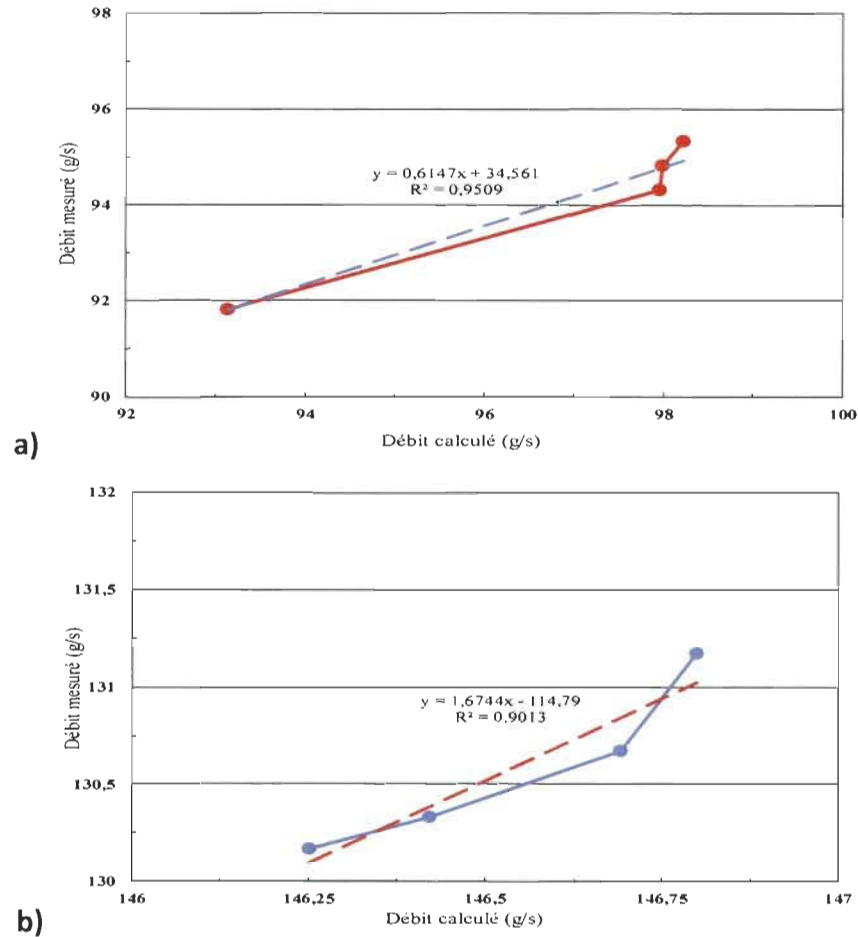


Figure 4.11 Relation entre le débit minimal calculé et le débit minimal mesuré du rideau pour les suspensions L-MNFC avec la CMC (a- Q=50L/min; b- Q=70L/min)

Le nombre des propriétés physiques (Ka) peut également être décrit comme suit:

$$Ka = \frac{\sigma^3 \rho}{g \mu^4} = \left[\frac{\left(\frac{\sigma}{e} \right)}{\left(\frac{\mu^* u}{e} \right)} \right]^2 * \left[\frac{\left(\frac{\sigma}{e} \right)}{\left(\frac{\rho g e}{\mu^* u} \right)} \right] * \left[\frac{\left(\frac{\rho^* u^2}{e} \right)}{\left(\frac{\mu^* u}{e} \right)} \right]^2 \quad \text{Éq. 4.9}$$

$= (\text{force de tension de surface} / \text{force de viscosité})^2 * (\text{force de tension de surface} / \text{force gravitationnelle}) * (\text{force d'inertie} / \text{force de viscosité})^2$

De l'équation 4.5 et l'équation 4.9, nous pouvons obtenir l'équation 4.10 :

$$Re = K_2 * \left[\frac{\left(\frac{\sigma}{e} \right)}{\left(\frac{\mu^* u}{e} \right)} \right]^{n_1} * \left[\frac{\left(\frac{\sigma}{e} \right)}{\left(\frac{\rho g e}{e} \right)} \right]^{n_2} \quad \text{Éq. 4.10}$$

= (force de tension de surface / force de viscosité)^{n₁} * (force de tension de surface / force gravitationnelle)^{n₂}

Comme le nombre de Reynolds (Re) représente le débit (dans ce cas, le débit minimal pour la formation du rideau), cette relation signifie que les limites de l'écoulement pour la formation du rideau sont dominées à la fois par les équilibres entre la force de tension de surface et la force visqueuse, et entre la force de tension de surface et la force gravitationnelle, le premier et le deuxième terme de l'équation 4.10, respectivement. Le débit minimal diminue (le rideau devient plus stable) en diminuant les ratios respectifs.

4.2.2 Débit minimal de la formation du rideau pour les suspensions L-MNFC avec tensioactif

La Figure 4.12 montre l'effet de la teneur en tensioactif sur la viscosité, la tension de surface des suspensions M-NIA (L-MNFC avec le tensioactif NIAPROOF à 0.01%; 0.03% et 0.05%) et sur le débit minimal du rideau (débit calculé) pour deux débits d'alimentations.

Avant les expériences, nous avons supposé que les tensioactifs diminuassent la tension de surface des suspensions L-MNFC pour augmenter la stabilité du rideau. Cependant, pour toutes les concentrations du tensioactif nous remarquons une diminution de la tension de surface des suspensions M-NIA, mais également une diminution de la viscosité avec un degré moins que la tension de surface.

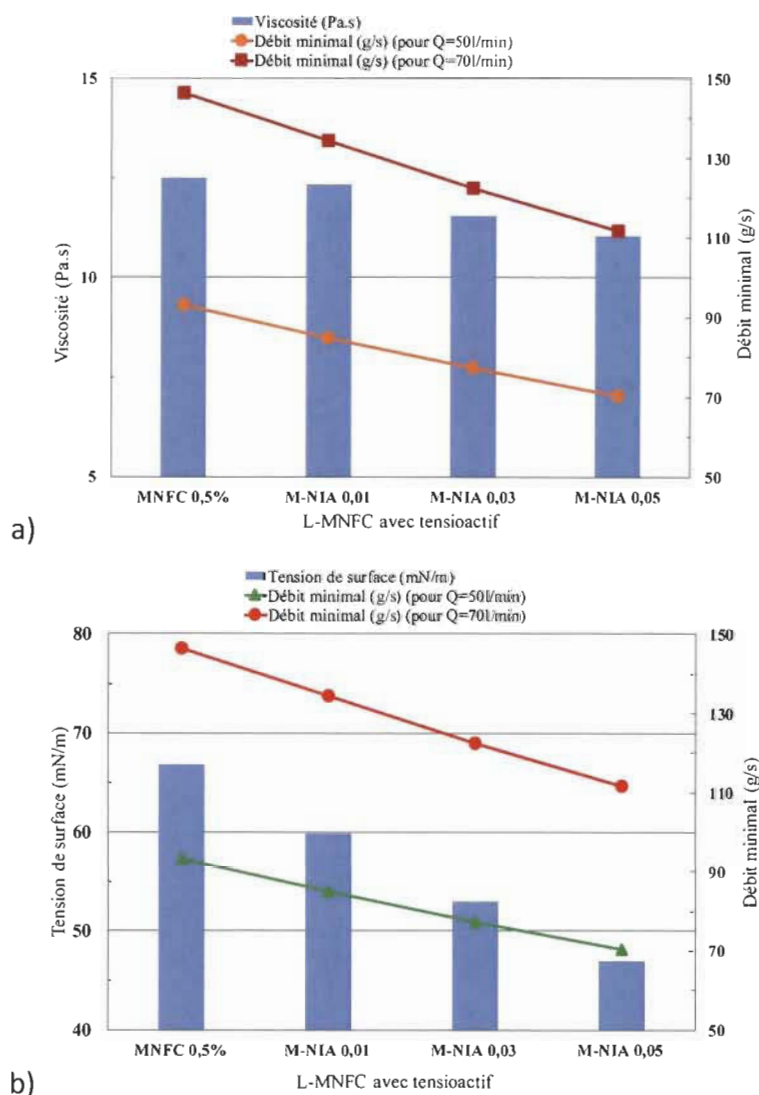


Figure 4.12 Effet de la teneur en tensioactif sur a) la viscosité, b) la tension de surface et sur le débit minimal du rideau (calculé) des suspensions L-MNFC

Le débit minimal, la tension de surface et la viscosité des suspensions M-NIA diminuent avec la teneur en tensioactif. Le tensioactif (NIAPROOF) a diminué la viscosité (diminution très légère), la tension de surface, mais également le débit minimal des suspensions M-NAI. Donc, la teneur en tensioactif entraîne une augmentation de la stabilité du rideau des suspensions M-NIA. (La viscosité est considérée comme résistance à la rupture du rideau et la tension de surface comme force de rupture).

Ces résultats démontrent que le tensioactif qui diminue la tension de surface, augmente la stabilité du rideau (débit minimal du rideau) mais il est important de signaler que les tensioactifs qui perturbent l'homogénéité de la surface même s'ils diminuent la tension de

surface, ont tendance à diminuer la stabilité du rideau. Nous pouvons dire également que même si la viscosité diminue légèrement avec l'addition du tensioactif (diminution de la résistance à la rupture du rideau), la diminution de la tension de surface (diminution de la force de rupture du rideau) favorise la diminution du débit minimal de la formation du rideau pour les suspensions M-NIA.

Donc, nous concluons que la tension de surface constitue le facteur principal pour la stabilité du rideau en face de la viscosité et la densité. Les présents résultats de l'effet du tensioactif sur le débit minimal du rideau des suspensions L-MNFC sont obtenus d'une manière analytique.

Il reste à vérifier la stabilité du rideau à travers des essais hors ligne sur l'HydraSizerTM pour visualiser le rideau des suspensions M-NIA. Dans ce qui suit, nous présentons les résultats de l'effet combiné (CMC et tensioactif) sur les suspensions L-MNFC.

4.2.3 Débit minimal de la formation du rideau pour les suspensions M-CMC-NIA (L-MNFC avec CMC et tensioactif)

La Figure 4.13 montre l'effet de l'addition de la CMC et du tensioactif sur la viscosité, la tension de surface et sur le débit minimal (calculé) des suspensions L-MNFC.

La viscosité, la tension de surface et le débit minimal du rideau diminuent avec l'augmentation de la quantité de la CMC et du tensioactif. Les mêmes explications données dans le cas de l'effet du tensioactif peuvent être suggérées dans le cas de l'effet combiné.

La tension de surface reste le facteur pertinent (plus que la viscosité) dans la stabilité du rideau pour les suspensions M-CMC-NIA. On peut dire qu'il y'a une synergie entre l'effet de la CMC et du tensioactif sur la stabilité du rideau. La CMC agit principalement sur la viscosité tandis que le tensioactif agit sur la tension de surface. La présence des deux additifs permet de diminuer significativement la viscosité et la tension de surface. et aussi le débit minimal du rideau à travers les phénomènes physico-chimiques cités précédemment (zêta potentiel pour la CMC) et le phénomène d'adsorption (concentration plus importante à la surface qu'à l'intérieur de la phase liquide) pour le tensioactif, ce qui

provoque la diminution de la tension de surface de la suspension L-MNFC. La dispersion de la L-MNFC est aussi favorisée puisque l'énergie nécessaire à l'augmentation de l'aire de l'interface est d'autant plus faible que la tension de surface est faible.

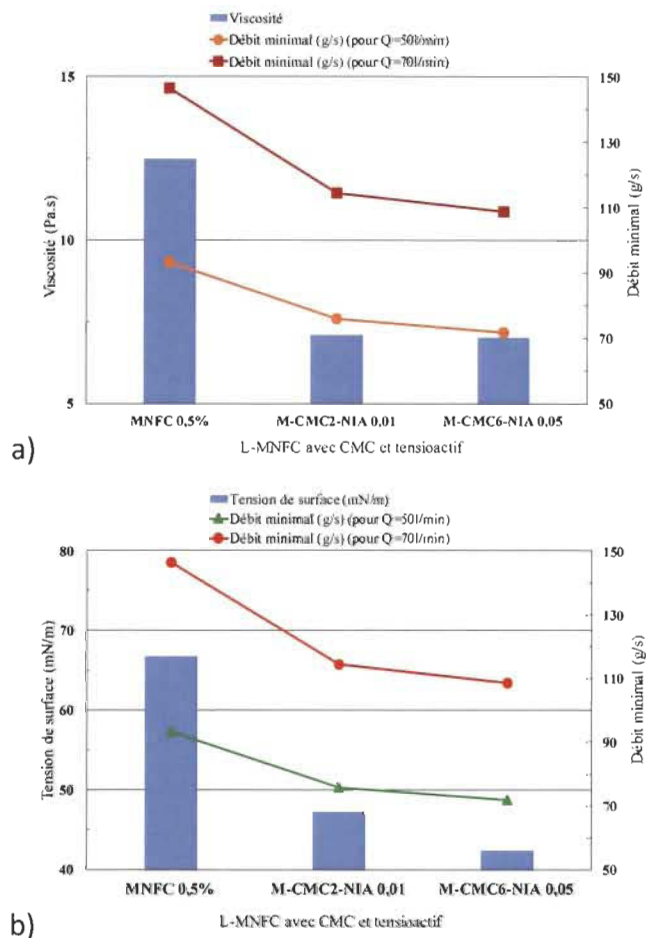


Figure 4.13 Effet combiné (tensioactif et CMC) sur a) la viscosité, b) la tension de surface et sur le débit minimal du rideau (calculé) des suspensions L-MNFC

4.2.4 Effet du guide de bord sur la stabilité du rideau pour l'HydraSizer™

Dans les installations industrielles, les échanges de chaleur sont considérables. Dans notre cas, La chaleur dans la suspension L-MNFC traversant les tuyaux de l'HydraSizer™ peut être transférée au rideau qui tombe à travers la fente (une étude préliminaire a été faite au laboratoire à deux températures constantes et a montré que la température augmente la viscosité de la suspension L-MNFC). Le comportement à la chute du liquide a été classé sous les trois formes suivantes: gouttelettes, jets et feuille (rideau) représentée à la Figure 4.14.

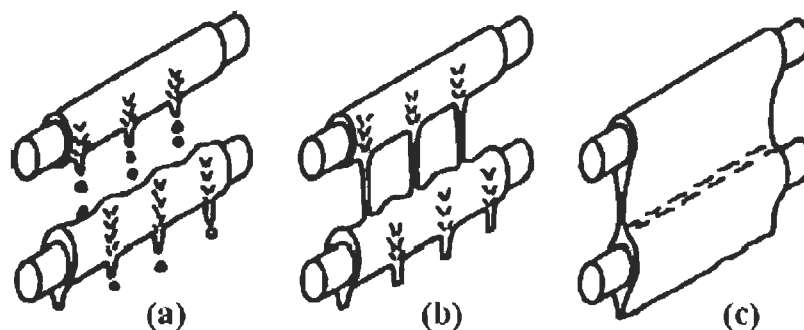


Figure 4.14 Les modes idéaux du film tombant (a) gouttelettes (b) jets (c) rideau

Certaines études ont examiné les effets du débit du fluide tombant, des propriétés du fluide et de la configuration des tuyaux sur le comportement du rideau à la sortie de la filière couchage rideau, et elles ont indiqué que le débit critique pour la formation du rideau est indiqué dans l'équation 4.11, qui est très similaire à notre équation (équation 4.5 et équation 4.6).

$$Re = A * K \dot{a}^n = 0,57 K \dot{a}^{0,25} \quad \text{Éq. 4.11}$$

Elles ont conclu que la constante A dépendait du type du fluide et n de la configuration particulière des tuyaux de la filière. Nous pouvons remarquer que, bien que le rideau soit formé sans guide de bord dans la configuration de la Figure 4.14, le débit critique pour la formation du rideau peut s'exprimer avec une forme très similaire à celle présentée dans cette étude. Ce fait suggère que la couche limite proche du guide de bord, souvent considérée comme l'une des causes de la rupture du rideau, n'affecte pas aussi fortement la stabilité du rideau dans cette étude. Le caractère aléatoire de la position de la rupture du rideau dans le sens de la largeur de la fente de l'HydraSizer™ suggère également cette notion. Il est conclu que les propriétés des suspensions L-MNFC dominent la stabilité du rideau dans la gamme de cette étude.

4.2.5 Conclusions

Nous avons mesuré expérimentalement le débit minimal pour la formation du rideau pour les suspensions L-MNFC avec CMC (suspensions M-CMC) et avons constaté que le débit minimal augmentait très légèrement avec la teneur en CMC pour les suspensions M-CMC. La stabilité du rideau des suspensions M-CMC diminue légèrement avec la diminution de

la viscosité (diminution de la résistance à la rupture) et l'augmentation de la tension de surface (augmentation de la rupture du rideau). De plus, l'effet du tensioactif et l'effet combiné (CMC et tensioactif) sur le débit minimal a été étudié. La stabilité augmente avec l'augmentation de la teneur en tensioactif (pour les suspensions M-NIA) et avec l'augmentation de CMC et de NIAPROOF (pour les suspensions M-CMC-NIA). Il est supposé que l'homogénéité de la surface soit très importante pour stabiliser le rideau des suspensions M-NIA et M-NIA-CMC. Si nous utilisons des tensioactifs qui diminuent la tension de surface des suspensions L-MNFC tout en conservant l'homogénéité de la surface d'écoulement, alors la stabilité du rideau augmente. Dans cette section, nous avons étudié la stabilité du rideau (écoulement de la suspension L-MNFC juste au niveau de la fente), et nous avons trouvé les conclusions citées précédemment. Nous avons pensé qu'il y'a une forte relation entre la stabilité du rideau et l'uniformité de l'écoulement interne des suspensions L-MNFC car la non uniformité de l'écoulement interne signifie que le vecteur vitesse de l'écoulement n'est pas constant en fonction du temps et de la position ce qui peut entraîner une instabilité du rideau au niveau de la fente et aussi au niveau de la zone de chute du rideau (écoulement externe). Dans ce qui suit, nous avons analysé l'écoulement interne et nous avons essayé de trouver et comprendre ce lien.

4.3 Analyse numérique de l'écoulement interne

Cette partie est dédiée pour l'analyse de l'écoulement interne de l'HydraSizer™ (Figure 3.6). Pour ce faire, nous présentons les résultats obtenus pour :

- La conception de l'HydraSizer™ avec ANSYS DesignModeler
- Maillage de l'HydraSizer™ avec ANSYS Meshing
- Simulation de l'écoulement avec ANSYS Fluent

4.3.1 Conception et maillage de l'HydraSizer™

Le collecteur situé après les tuyaux d'entrée est sous forme d'une cavité et une fente. Nous avons considéré le tuyau d'entrée, le collecteur et aussi la fente en aval afin de pouvoir évaluer l'écoulement interne des suspensions L-MNFC. Ce système a été maillé avec ANSYS Meshing FLUENT en utilisant un maillage CutCell décrite dans le chapitre

3. Le volume interne était maillé avec environ 1.2 million d'éléments (Figure 4.16). La taille moyenne d'un élément est de $1.54 \cdot 10^{-2} \text{ mm}^3$, la taille maximale est de $6.19 \cdot 10^{-2} \text{ mm}^3$. La Figure 4.15 montre la conception de l'HydraSizer™ que nous avons créé sur ANSYS DesignModeler.

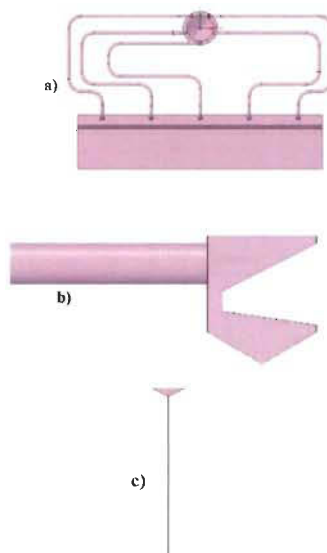
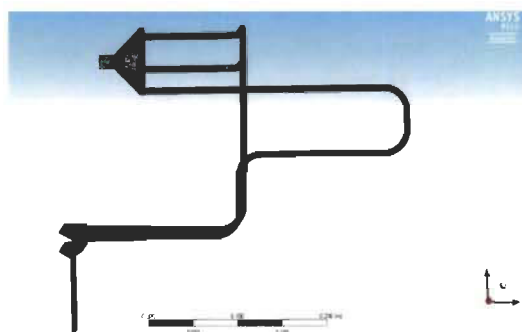


Figure 4.15 Conception CAO avec SpaceClaim : a) vue en face de l'HydraSizer™; b) Cavité de l'HydraSizer™ (vue de droite); c) Fente de l'HS™ (vue de gauche)

La qualité du maillage résultant nécessite une vérification car elle pourrait grandement affecter la précision de la solution CFD. Nous avons vérifié la symétrie et nous avons remarqué qu'il y a quelques "mauvais éléments", mais ils ne représentent qu'environ 3.7% du nombre total d'éléments. De plus, ils ne sont pas regroupés au même endroit. La Figure 4.16 montre les résultats du maillage de l'HydraSizer™ (Figure 3.6) (Entrée, cavité et fente).



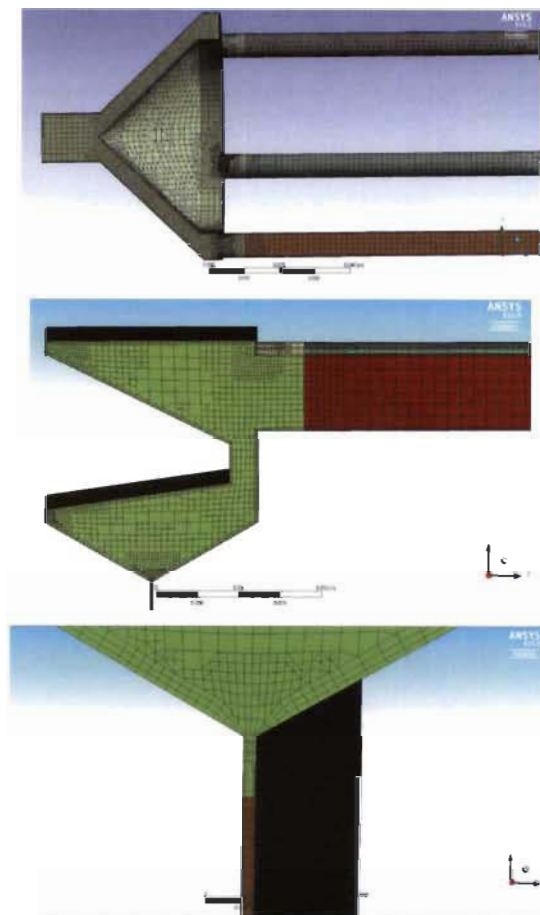


Figure 4.16 Maillage en 3D (vue gauche)

4.3.2 Simulation CFD de l'écoulement interne

Nous avons vérifié la convergence du maillage car elle a un impact considérable sur la précision des résultats. La solution est convergente lorsque toutes les équations de transport discrétisées sont obéies à une tolérance spécifiée définie par le résidu ANSYS Fluent ou lorsque la solution ne change plus avec plusieurs itérations.

Les résidus permettent de montrer quelles équations pourraient poser des problèmes de convergence et de mesurer le déséquilibre des équations de conservation. Sur la Figure 4.17, on peut remarquer qu'au-delà de 1000 itérations, les résidus de toutes les courbes restent constants. Il faut noter que 3000 itérations nécessitent 22 heures de temps de calcul. C'est pourquoi nous avons autorisé environ 1000 itérations pour tous les tests suivants, ce qui prend environ 3 heures de temps de calcul avec une station de travail Pentium 4 (processeur fonctionnant à 3.0 GHz / 3 Go de mémoire).

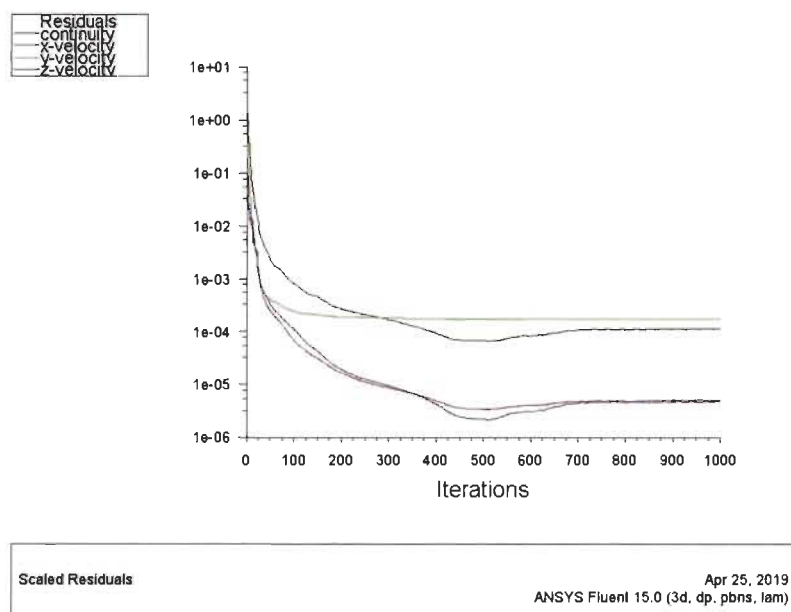
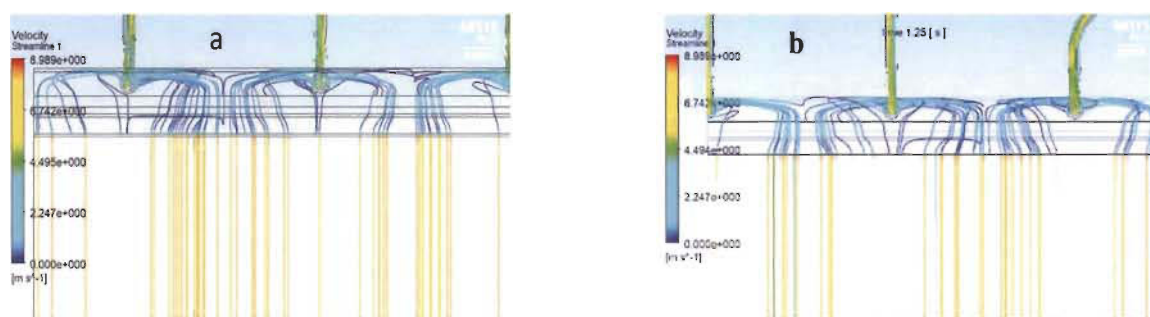


Figure 4.17 Convergence de l'équation de continuité et de conservation

Le temps de calcul est considérablement réduit lorsque nous simulons l'écoulement interne à l'aide d'un écoulement stable.

Nous avons constaté qu'il n'y avait pas de différence entre un écoulement stable et un écoulement instable, quelles que soient les conditions de fonctionnement et le type de suspension utilisée (l'hypothèse stable signifie que la vitesse, pression, pousse et densité a un point fixe particulier qui ne change pas avec du temps). De plus, nous ne nous intéressons pas ici à l'étude des phénomènes transitoires. La Figure 4.18 met en évidence ces résultats en traçant les lignes de courant pour les deux cas.



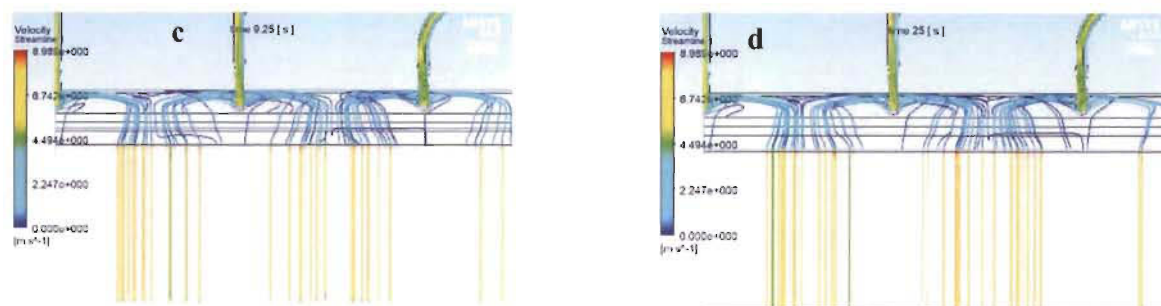


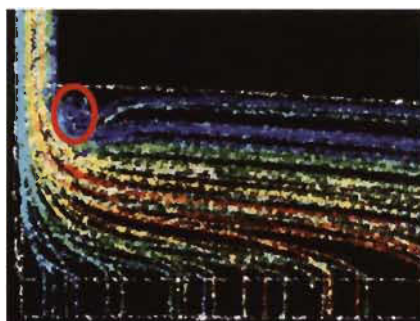
Figure 4.18 Évolution des lignes de courant pour : a) cas d'écoulement stable ; b), c) et d) cas d'écoulement instable

Nous comparons la forme des lignes de courant dans le cas d'écoulement instable à plusieurs reprises (1.25s;9.25s et 25s) à celle dans le cas de l'écoulement stable. Il est évident qu'il n'y a plus de différence entre les deux cas. Par conséquent, afin de réduire le temps de calcul, les simulations de l'écoulement interne sont effectuées en considérant le cas d'écoulement stable.

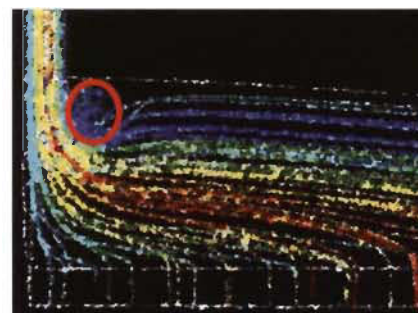
Nous nous intéressons maintenant à l'influence de la rhéologie des suspensions L-MNFC sur l'uniformité de l'écoulement dans la cavité. Dans cette section, nous avons étudié l'effet de la viscosité et de la tension de surface par l'ajout de la CMC, du tensioactif, des deux à la fois et du débit sur l'écoulement interne des suspensions L-MNFC.

- **Effet de la CMC sur l'écoulement interne**

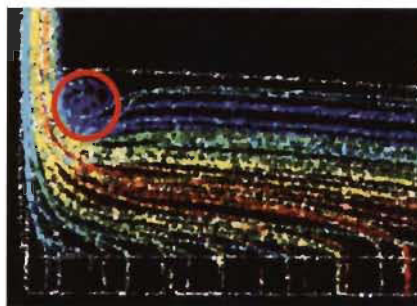
Les résultats des simulations réalisées pour l'écoulement interne des suspensions M-CMC (L-MNFC avec CMC) sont présentées sur la Figure 4.19.



L-MNFC0.5% ($\mu=12.5$; $\sigma=66.83$; $Q=50\text{L/min}$)



M-CMC2($\mu=8.22$; $\sigma=67.28$; $Q=50\text{L/min}$)



M-CMC6 ($\mu=7.56$; $\sigma=68.29$; $Q=50\text{L/min}$)

Figure 4.19 Trajectoire de l'écoulement interne des suspensions M-CMC (L-MNFC avec CMC)

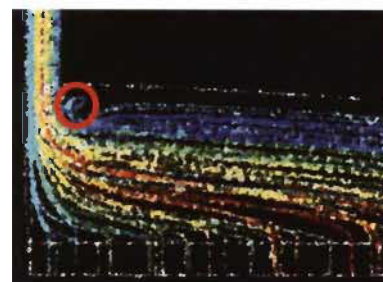
Nous avons simulé l'écoulement avec des débits plus élevés, des viscosités qui diminuent en fonction de la teneur en CMC et des tensions de surface qui augmentent légèrement pour les suspensions M-CMC. Les résultats ont clairement montré que l'augmentation du débit et de la tension de surface (légère augmentation de la tension de surface en fonction de la teneur en CMC), et la diminution de la viscosité entraîne des perturbations significatives reliées à la formation du tourbillon. En effet, la simulation approximative de la cavité de l'HydraSizerTM montre un tourbillon proche de la jonction entre le tuyau d'entrée et la cavité pour les suspensions L-MNFC0.5%, M-CMC2 et M-CMC6. En outre, il est important de signaler que la taille du tourbillon augmente légèrement avec l'augmentation de la teneur en CMC et du débit d'alimentation de l'HydraSizerTM. Pour les suspensions M-CMC, la création du tourbillon semble être liée essentiellement à la viscosité et au débit.

- **Effet du tensioactif sur l'écoulement interne**

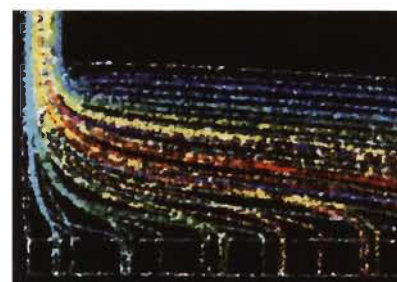
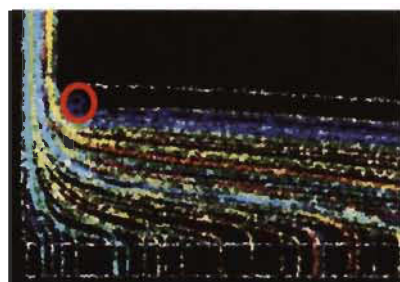
Les résultats des simulations réalisées pour l'écoulement interne des suspensions M-NIA (L-MNFC avec NIAPROOF) sont présentées sur la Figure 4.20. Nous avons étudié l'effet du débit, de la viscosité et de la tension de surface sur l'écoulement interne des suspensions M-NIA.

La visualisation CFD de la trajectoire des microfibrilles a permis de constater que le tourbillon repéré au niveau de l'écoulement de la suspension L-MNFC0.5% s'est dégradé avec la diminution du débit d'alimentation, la diminution légère de la viscosité et avec la diminution de la tension de surface, comme il est décrit par la Figure 4.20. Chaque ligne

de couleur représente une trajectoire. Cela signifie que nous suivons les particules de la suspension une à une, du tuyau d'entrée au bout de la fente.



L-MNFC 0.5% ($\mu=12.5$; $\sigma=66.83$; $Q=70\text{L/min}$) M-NIA0.01 ($\mu=12.33$; $\sigma=59.85$; $Q=50\text{L/min}$)

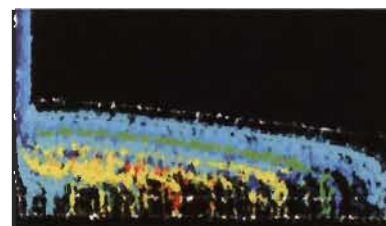
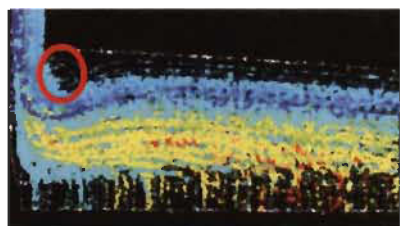


M-NIA0.03 ($\mu=11.55$; $\sigma=53$; $Q=50\text{L/min}$) M-NIA0.05 ($\mu=11.04$; $\sigma=47.01$; $Q=50\text{L/min}$)

Figure 4.20 Trajectoire de l'écoulement interne des suspensions M-NIA (L-MNFC avec NIAPROOF)

- **Effet combiné (tensioactif et CMC) sur l'écoulement interne**

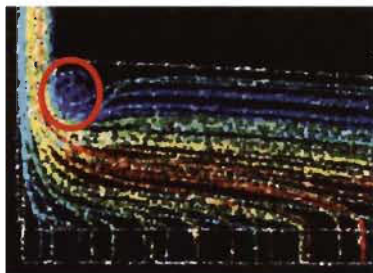
Les résultats des simulations réalisées pour l'écoulement interne des suspensions M-CMC-NIA (L-MNFC avec NIAPROOF et CMC) sont présentées sur la Figure 4.21. Les visualisations ont montré que l'écoulement des suspensions est devenu plus uniforme grâce à la disparition du tourbillon. Le tensioactif a un effet évident sur l'uniformité de l'écoulement interne des suspensions L-MNFC, cela est dû principalement à une bonne dispersion appliquée par le tensioactif sur les fibrilles de la L-MNFC.



M-CMC2-NIA0.01($\mu=7.1$; $\sigma=47.28$; $Q=50\text{L/min}$) M-CMC6-NIA0.05($\mu=7.02$; $\sigma=42.45$; $Q=50\text{L/min}$)

Figure 4.21 Trajectoire de l'écoulement interne des suspensions M-CMC-NIA (L-MNFC avec NIAPROOF et CMC)

L'effet du débit a été trouvé pour une suspension de M-CMC6 suivant une loi de puissance avec un indice de loi de puissance et un indice de consistance fixes. Les résultats sont présentés à la Figure 4.22. L'augmentation du débit entraîne une augmentation de la taille du tourbillon. On peut interpréter ce phénomène par l'apparition de la viscosité dite "turbulente", Toutes les suspensions L-MNFC testées avec Leurs indices de loi de puissance et leurs indices de consistance sont regroupés au (Tableau 4.4)



M-CMC6 ($\mu=7.56$; $\sigma=68.29$; $Q=50\text{L/min}$)



M-CMC6 ($\mu=7.56$; $\sigma=68.29$; $Q=70\text{L/min}$)

Figure 4.22 Effet du débit sur la formation du tourbillon pour un fluide en loi de puissance (suspension M-CMC6) avec $K=0.68\text{Pa.s}^n$ et un indice de loi de puissance $n=0.76$

Le Tableau 4.4 regroupe l'ensemble des simulations réalisées pour toutes les suspensions L-MNFC (avec CMC, avec tensioactif et avec les deux). Les simulations sont faites pour les deux débits d'alimentation du circuit d'HydraSizer™.

Nous avons remarqué que pour les suspensions pures (L-MNFC seule) et pour les suspensions M-CMC (L-MNFC avec CMC), le passage de 50L/min à 70L/min entraîne l'apparition de plus de perturbations. Nous signifions par perturbations le tourbillon observé sur la simulation de la trajectoire des particules de la suspension, la taille du tourbillon augmente avec l'augmentation du débit.

L'augmentation du débit pour les suspensions M-NIA n'entraîne pas une perturbation considérable sauf pour la suspension M-NIA0.01 où une perturbation claire est observée. La même observation peut se faire pour les suspensions M-CMC-NIA (avec une concentration de 0.01% de NIAPROOF). L'augmentation de la concentration en tensioactif diminue les perturbations pour les deux types de suspension M-NIA et M-CMC-NIA.

Tableau 4.4 Résumé des simulations pour les suspensions L-MNFC en loi de puissance dans la cavité de l'HydraSizer™

Numéro de la simulation	Indice de loi de puissance						Indice de consistance (Pa.s ⁿ)						Débit (L/min)	
	0.68	0.69	0.7	0.73	0.75	0.76	0.6	0.68	1.1	1.19	1.84	2.06	50	70
1	X											X	X	
2	X											X		X
3		X								X			X	
4		X								X				X
5						X		X					X	
6						X		X						X
7				X							X		X	
8				X							X			X
9					X						X		X	
10					X						X			X
11		X							X				X	
12		X							X					X
13			X				X						X	
14			X				X							X

• **Conclusion sur l'analyse CFD de l'écoulement interne**

Nous avons simulé l'écoulement des suspensions L-MNFC et étudié l'impact des propriétés rhéologiques et physiques (viscosité et tension de surface) et des conditions opératoires (débit) dans la cavité de l'HydraSizer™. Nous avons montré que pour les suspensions M-CMC, la diminution de la viscosité et l'augmentation légère de la tension de surface (augmentation de la teneur en CMC) augmente la taille de la perturbation (taille du tourbillon). D'un autre côté, et pour les suspensions M-NIA, la taille de la perturbation observée au niveau de la suspension L-MNFC0.5% diminue avec l'augmentation de la teneur en NIAPROOF (diminution de la tension de surface et diminution légère de la viscosité). Enfin, l'effet combiné de la CMC et du tensioactif conduit à la diminution du tourbillon et à sa disparition pour 6% en CMC et 0.05% du NIAPROOF. L'effet du débit est bien clair pour les suspensions M-CMC : l'augmentation du débit augmente clairement la taille du tourbillon et donc la perturbation de l'écoulement. Pour les suspensions M-NIA et les suspensions M-CMC-NIA le débit n'a pas d'effet significatif sur l'écoulement. L'impact des paramètres physiques et rhéologiques sur l'uniformité de l'écoulement des suspensions L-MNFC peut se résumer dans le Tableau 4.5. (++ : fort effet; + : léger effet)

Tableau 4.5 Effet des paramètres physiques et rhéologiques sur l'uniformité de l'écoulement dans la cavité de l'HydraSizer™

Suspensions L-MNFC	Effet de l'augmentation de			
	Tension de surface	Viscosité	Débit	Densité
M-CMC	+	++	++	+
M-NIA	++	+	+	+
M-CMC-NIA	++	++	+	+

Nous pouvons interpréter les résultats observés :

La diminution de la viscosité donne naissance à une ``**viscosité turbulente**`` et donc augmente le nombre de Reynolds qui définit le régime de l'écoulement. En plus, le tourbillon est seulement localisé proche de l'entrée de la cavité. Dans le reste de la cavité, nous constatons que l'écoulement est uniforme. Nous pouvons lier cette perturbation aussi à la géométrie. Par contre, pour d'autres suspensions et même en diminuant la viscosité, nous n'observons pas de tourbillon, cela peut s'expliquer peut-être par la présence du tensioactif et donc par la diminution de la tension de surface qui reflète la force de rupture de la suspension. D'après cette partie de simulation CFD, nous venons de confirmer plus ou moins les résultats de la section précédente sur la stabilité du rideau au niveau de la fente (rupture du rideau).

• Résultats de l'étude analytique

Nous avons évalué l'indice d'uniformité pour les différentes suspensions L-MNFC et pour différentes valeurs de N_v (qui reflète le nombre de Reynolds). Les figures (Figure 4.23; Figure 4.24 et Figure 4.25) montre les résultats obtenus. L'indice d'uniformité diminue en fonction du nombre visqueux, cela veut dire qu'on augmentant le nombre de Reynolds l'uniformité de l'écoulement diminue (ce qui est conforme aux résultats précédents). En outre, nous n'observons pas une évolution claire de l'uniformité en fonction de l'indice de la loi de puissance.

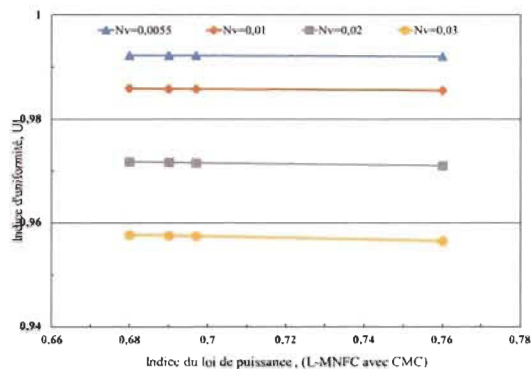


Figure 4.23 Indice d'uniformité des suspensions M-CMC en fonction de N_v

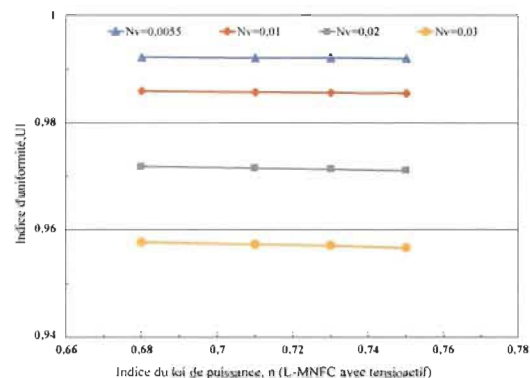


Figure 4.24 Indice d'uniformité des suspensions M-NIA en fonction de N_v

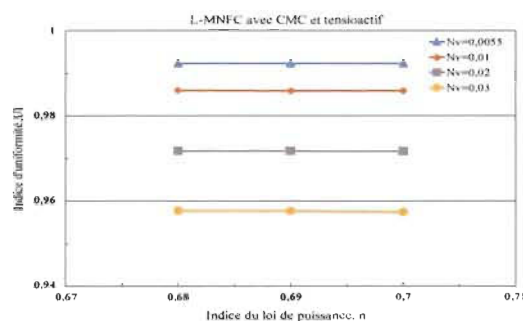


Figure 4.25 Indice d'uniformité des suspensions M-CMC-NIA en fonction de N_v

La variation de l'indice d'uniformité peut être interprété par la variation de la pression à l'entrée de l'HydraSizer™.

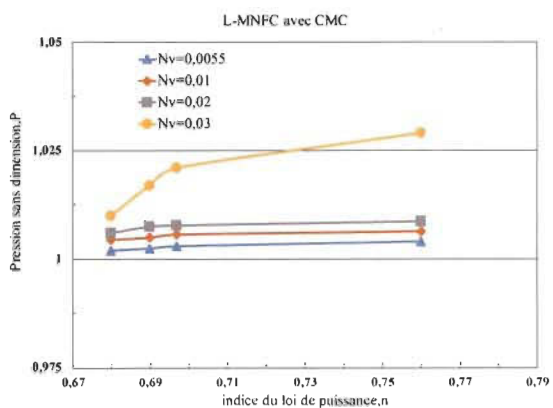


Figure 4.26 Pression des suspensions M-CMC en fonction de N_v

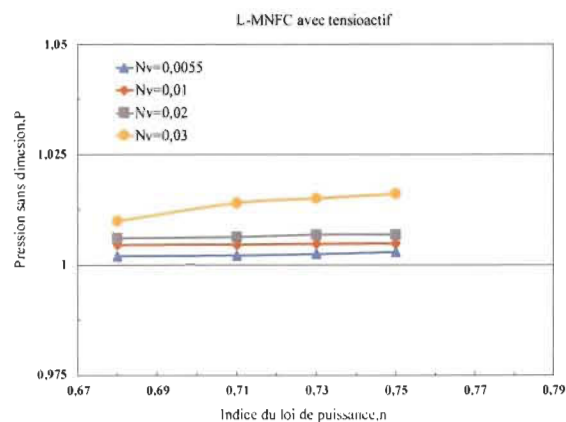


Figure 4.27 Pression des suspensions M-NIA en fonction de N_v

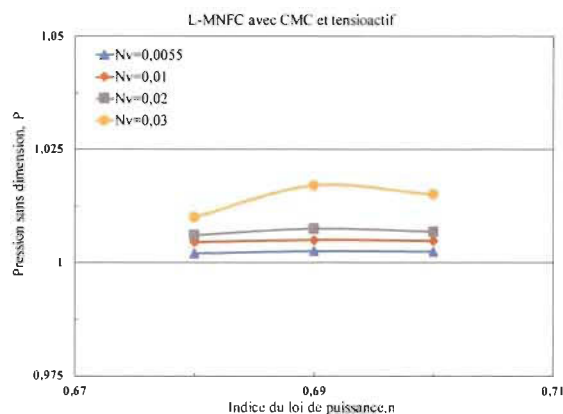


Figure 4.28 Pression des suspensions M-CMC-nia en fonction de N_v

Les figures (Figure 4.26; Figure 4.27 et Figure 4.28) montrent les résultats de la pression sans dimension en fonction de l'indice de puissance pour différentes valeurs de N_v des suspensions L-MNFC, M-CMC, M-NIA et M-CMC-NIA. La pression augmente en fonction du nombre visqueux (valeurs du nombre de Reynolds) ce qui explique la diminution de l'uniformité de l'écoulement interne. En plus, nous ne nous constatons pas une variation de la pression en fonction de l'indice de la loi de puissance.

4.4 Analyse de l'écoulement externe et paramètres extensionnelles de la L-MNFC

Les calculs du couchage rideau avec l'HydraSizerTM et la L-MNFC ont été effectués par rapport à la machine à papier d'Innofibre notre à des vitesses de 100m/min (vitesse minimale) et 200 m/min (vitesse utilisée lors de nos essais en ligne). L'objectif de nos calculs est de d'augmenter notre savoir-faire pour l'écoulement externe du rideau L-MNFC. La relation entre les paramètres de fonctionnement les plus importants a été comprise dans la partie méthodes (chapitre 3). Le nombre de paramètres impliqués est élevé et la relation entre eux est complexe. La méthode proposée est basée sur modélisation analytique simple pour optimiser l'HydraSizerTM et mieux comprendre les corrélations entre les conditions de fonctionnement et les paramètres propres à l'écoulement externe du rideau L-MNFC, alors il était nécessaire de créer des modèles théoriques et mathématiques simples et pratiques pour décrire le couchage rideau. Nous présentons quelques résultats obtenus par des calculs fondamentaux en utilisant les

corrélations entre les conditions de fonctionnement (débit) et la qualité du couchage (en fonction des paramètres d'étirement). Pour une vitesse de 200m/min, l'épaisseur du rideau au niveau de la zone d'impact est calculée pour les suspensions L-MNFC0.5%, M-CMC6, M-NIA0.05 et M-CMC6-NIA0.05. La détermination de l'épaisseur du rideau au niveau de la ligne d'impact permet de comprendre l'effet des additifs sur l'accélération du rideau et son développement au cours du processus. La qualité du couchage rideau peut s'exprimer à travers le calcul des paramètres d'étirement. La détermination des défauts de couchage sur le papier structuré et l'utilisation des graphiques (étirement opérationnel-taux d'étirement) et (étirement opérationnel-étirement total) peuvent déterminer les paramètres critiques χ_{crit} et γ_{crit} .

- **Épaisseur du rideau L-MNFC dans la zone d'impact**

L'épaisseur S_{imp} en fonction du débit pour les suspensions L-MNFC, M-CMC et M-NIA est illustrée sur la Figure 4.29.

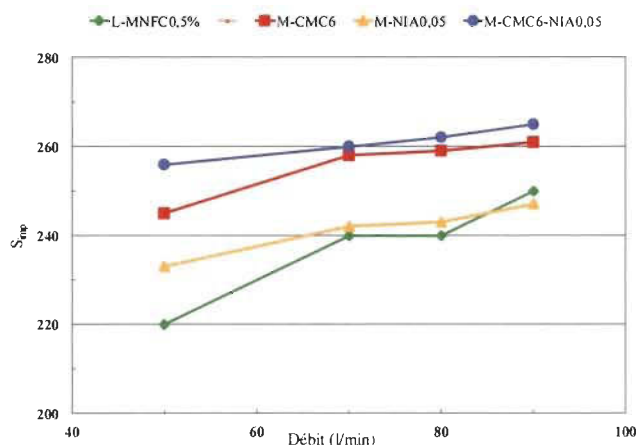


Figure 4.29 Épaisseur du rideau L-MNFC en fonction du débit pour différentes suspensions

D'après la Figure 4.29, l'épaisseur du rideau L-MNFC dans la zone d'impact augmente en fonction du débit de fonctionnement. Nous constatons également que l'épaisseur du rideau augmente en fonction des additifs. Les suspensions M-CMC-NIA offre l'épaisseur du rideau le plus élevé. La CMC offre une épaisseur plus le tensioactif (ce qui est relié au degré de dispersion élevé de la CMC par rapport au tensioactif dans la zone d'impact : les fibrilles de la LMNFC sont bien distribuées le moment d'interaction avec le substrat). En

relation avec ce qui est fait avant, nous pouvons dire que la CMC et le tensioactif offre un écoulement interne uniforme, une stabilité du rideau et une épaisseur élevée au niveau de la zone d'impact. De ce fait, nous avons montré la relation entre le rideau dans la zone d'impact, la stabilité du rideau et l'uniformité de l'écoulement interne. Une optimisation des suspensions L-MNFC peut être proposée à travers l'utilisation des deux modificateurs à la fois (CMC et tensioactif).

• Taux d'étirement

Le taux d'étirement du rideau L-MNFC a été évalué en fonction du débit de fonctionnement pour les suspensions L-MNFC, M-CMC, M-NIA et M-CMC-NIA. La Figure 4.30 illustre les résultats des calculs obtenus.

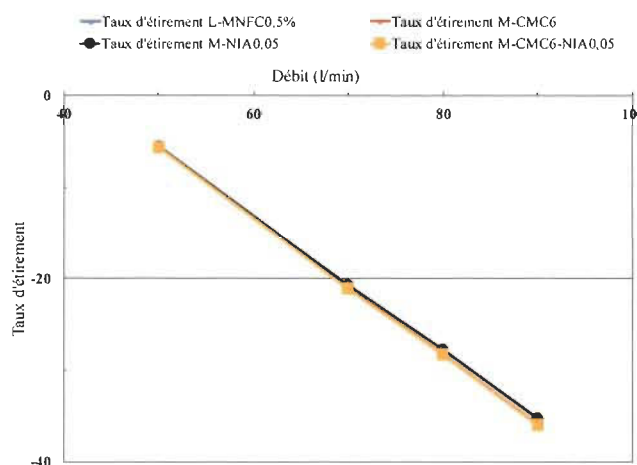


Figure 4.30 Taux d'étirement du rideau en fonction du débit pour les suspensions L-MNFC

Les résultats montrent clairement que le taux d'étirement diminue en augmentant le débit, cela veut dire que la vitesse avec laquelle l'épaisseur du rideau L-MNFC change diminue en augmentant le débit. La vitesse de changement du rideau de la suspension L-MNFC0,5% reste élevée par rapport aux suspensions M-CMC, M-NIA et M-CMC-NIA. Cela reflète que les additifs (CMC et tensioactif) retardent la variation de l'épaisseur du rideau ce qui permet d'avoir une couche uniforme de la L-MNFC sur le papier structuré. Ensuite, l'étirement opérationnel est examiné en fonction de l'étirement total et du taux d'étirement.

- **Étirement opérationnel en fonction de l'étirement total et du taux d'étirement**

Les figures (Figure 4.31 et Figure 4.32) montrent un exemple de calcul de l'étirement opérationnel (pour la suspension L-MNFC0.5%) en fonction de l'étirement total et du taux d'étirement pour l'HydraSizer™. Nous analysons que le couchage rideau est réalisable à un étirement total faible cela veut dire que à des vitesses très élevées, le procédé est difficile à réaliser. Ces graphiques peuvent clarifier les limites des conditions de fonctionnement menant à une qualité de couchage bonne ou mauvaise. Les valeurs critiques χ_{crit} et γ_{crit} peuvent être déterminées à l'aide des essais sur le papier final. Si des défauts sont repérés sur le papier structuré, nous déterminons la fenêtre opérationnelle du couchage rideau en se limitant aux conditions de fonctionnement qui donnent un produit final accepté. Une fenêtre opérationnelle peut être déterminée comme mentionnée sur (Figure 4.31).

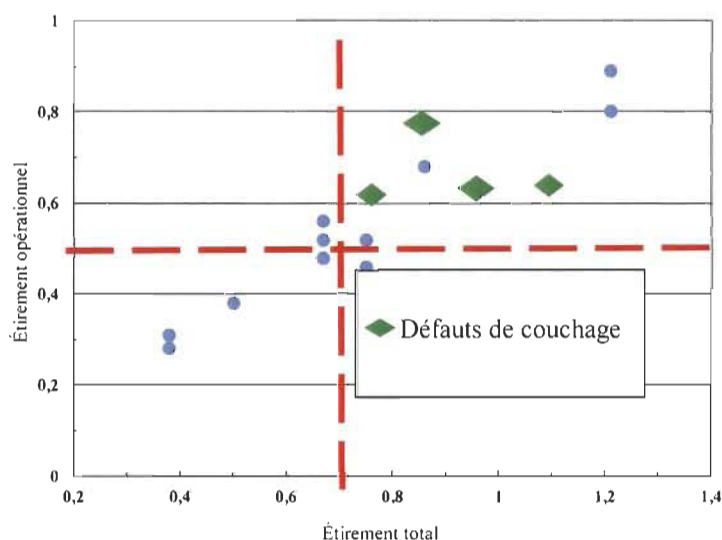


Figure 4.31 Étirement opérationnel en fonction de l'étirement total

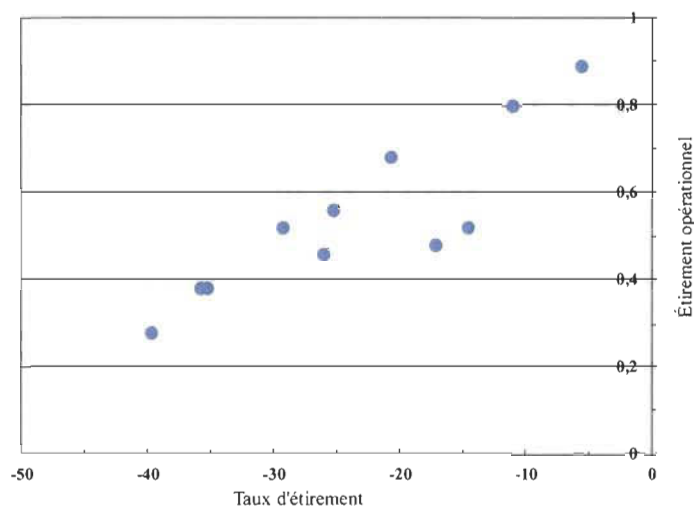


Figure 4.32 Étirement opérationnel en fonction du taux d'étirement

- **Conclusion**

Le calcul des facteurs d'étirement et du taux d'étirement du rideau en fonction des conditions de fonctionnement de l'HydraSizer™ ainsi que la description rhéologique des suspensions L-MNFC permettent une analyse plus précise du procédé couchage rideau. Des paramètres utiles sont déduits avec cette méthode proposée et des corrélations fonctionnelles sont obtenues pour évaluer la faisabilité du couchage rideau avec une bonne qualité.

La description de ces paramètres en fonction de la qualité du couchage permet de déterminer les limites de la fenêtre opérationnelle en fonction des conditions de fonctionnement de l'HydraSizer™ et des caractéristiques de la suspension L-MNFC. Après les travaux de caractérisation, d'analyse d'écoulement, une étude expérimentale est faite pour tester le fonctionnement de l'HydraSizer™ et valider les résultats précédents.

4.5 Capacité de la (L-MNFC+CMC) dans les essais hors-ligne d'Hydra-Sizer™

L'application de la MNFC en tant qu'agent de couchage dans le procédé couchage rideau est réalisée par l'Hydra-Sizer™ de GL&V. L'objectif de cette section est d'abord

d'étudier le fonctionnement de l'Hydra-Sizer™, puis d'appliquer une partie du savoir-faire développé pour la rhéologie de la MNFC dans le processus réel.

Tout d'abord, la capacité de fonctionnement de l'Hydra-Sizer™ est testée (avec de l'eau uniquement), puis la performance de la MNFC dans l'Hydra-Sizer™ est évaluée.

4.5.1 Efficacité de l'Hydra-Sizer™

L'aptitude au fonctionnement de l'Hydra-Sizer™ est essentielle pour une application efficace et contrôlée des suspensions MNFC dans un couchage rideau. Il est alors intéressant d'examiner l'uniformité et les effets des suspensions de viscosité différente sur le fonctionnement de l'Hydra-Sizer™.

- **Écoulement de l'eau**

L'efficacité est évaluée avec la stabilité du débit d'eau le long de la sortie d'Hydra-Sizer™. Il convient de noter que l'Hydra-Sizer™ que nous utilisons dans ces essais est un équipement à l'échelle pilote fourni par GL&V pouvant être installé sur une machine à papier pilote d'Innofibre. Dans le (Tableau 4.6), nous présentons le plan expérimental : quatre tests avec différents taux de recirculation ont été effectués (la recirculation permet d'ajuster le débit à l'intérieur de l'HS™). La recirculation 0 signifie que la vanne de recirculation est complètement fermée; les tests n°2 et n°3 représentent la vanne ouverte à environ 1/3 et 2/3, respectivement; La recirculation 1 atteint le taux de recirculation maximal.

Tableau 4.6 Essais de l'eau dans l'Hydra-Sizer™ hors ligne

Essai # 1	Recirculation 0	Essai # 3	Recirculation 2/3
Essai # 2	Recirculation 1/3	Essai # 4	Recirculation 1

Pour chaque essai, le débit massique des trois positions (Figure 3.16) le long de la sortie est mesuré pour évaluer l'uniformité du débit. De plus, l'ouverture de la buse des trois positions est mesurée avec précision (par une jauge remplissage métrique). La Figure 4.33 montre les résultats obtenus lors de nos essais.

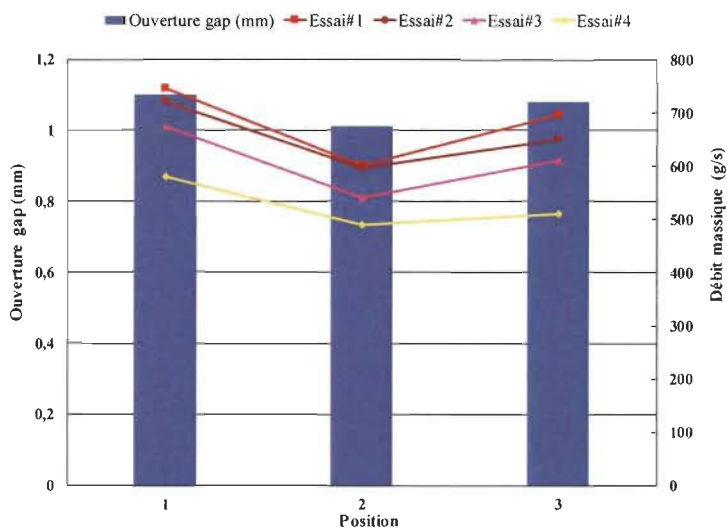


Figure 4.33 Débit massique de l'eau avec différents taux de recirculation et ouverture de buse à différentes positions

Comme le montre la Figure 4.33, l'ouverture de la buse en position 2 est un peu plus petite que dans les autres positions, ce qui se traduit par un écoulement massique inférieur à celui trouvé pour la position 2. La recirculation accrue conduit à la réduction du débit massique pour chaque position, mais l'uniformité ne change pas en fonction de la recirculation. L'uniformité du rideau peut être améliorée en ajustant avec précision l'ouverture de la buse : le défaut est probablement lié à l'équipement (le seul disponible) dont nous disposons pour ces essais.

- **Écoulement de l'eau + modificateur rhéologique (CMC)**

L'objectif final étant d'explorer la dispersion de la MNFC dans Hydra-Sizer™, l'influence de la rhéologie de la MNFC sur le fonctionnement de Hydra-Sizer™ est une condition préalable à analyser. Dans ce cas, la CMC est utilisée comme modificateur rhéologique pour étudier l'effet du changement de la viscosité sur la rentabilité de l'Hydra-Sizer™.

Les suspensions CMC à différentes concentrations sont utilisées dans l'Hydra-Sizer™ en mode hors ligne. La Figure 4.34 présente la viscosité de chaque suspension et le débit massique global au cours du fonctionnement.

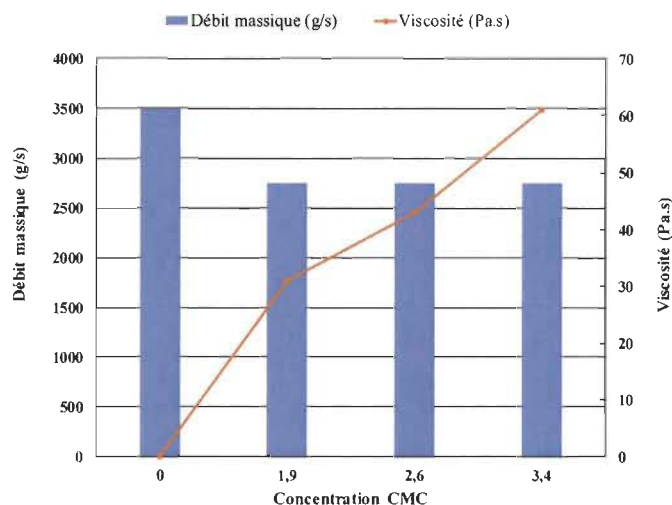


Figure 4.34 Débit massique et viscosité de la CMC

Comme le montre la Figure 4.34, tout en augmentant la concentration de la CMC, et donc la viscosité de la suspension, le débit massique global diminue légèrement mais reste constant pour les trois concentrations de CMC testées.

En utilisant une pompe à déplacement positif, il est apparu que la viscosité avait peu d'influence sur le débit massique global: un point d'intérêt pratique car on pourrait alors se concentrer sur le meilleur niveau de dispersion de la MNFC.

4.5.2 Performance de la MNFC dans les essais hors ligne d'Hydra-Sizer™

L'ouverture de la buse a été ajusté à 1.02 mm pour améliorer l'uniformité de l'écoulement et deux suspensions: L-MNFC 0.5% et L-MNFC 0.5% + CMC 6% sont appliquées pour les essais hors ligne à des débits correspondant de 50 et 70 L/min. Ces essais visent à vérifier la performance de la technologie L-MNFC dans l'Hydra-Sizer™ (avant les essais pilotes sur les machines à papier), y compris la stabilité du rideau et l'uniformité de l'écoulement.

- **L-MNFC 0.5%**

La Figure 4.35 montre le rideau de la L-MNFC 0.5% à un débit de 50 L/min et 70 L/min. Pour la suspension L-MNFC 0.5%, les deux rideaux sont restés stables pendant plusieurs

dizaines de secondes mais qui ne le restent pas au fil du temps. Le rideau à 70 L/min présente une certaine dégradation (rupture) dans la partie basse.

De ce constat, il convient de noter qu'en réalité, si l'Hydra-Sizer™ serait installé à une hauteur proche de la section de formation de la machine à papier, la dégradation produite ne serait pas critique.

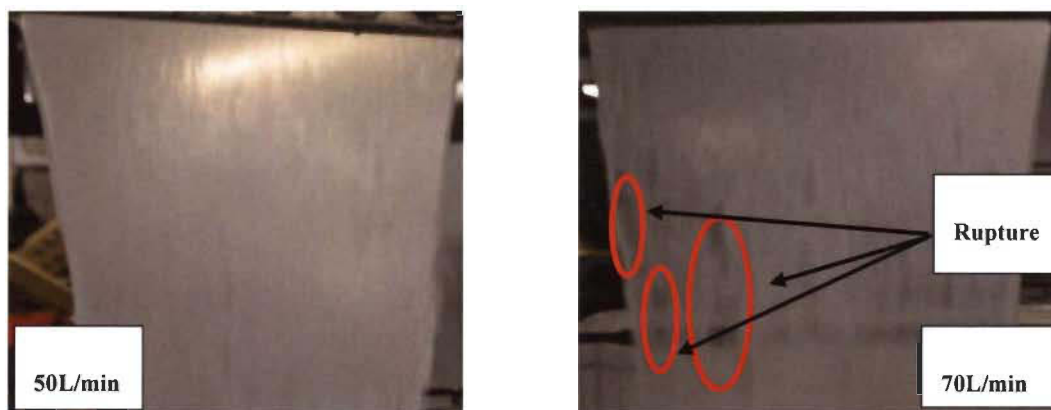


Figure 4.35 Écoulement rideau pour la suspension L-MNFC 0.5% (à 50 L/min de débit (à gauche) et à 70 L/min de débit (à droite))

Aux débits de 50 L/min et 70 L/min, le débit massique aux trois positions le long de la sortie de Hydra-Sizer™ est mesuré et présenté à la Figure 4.36.

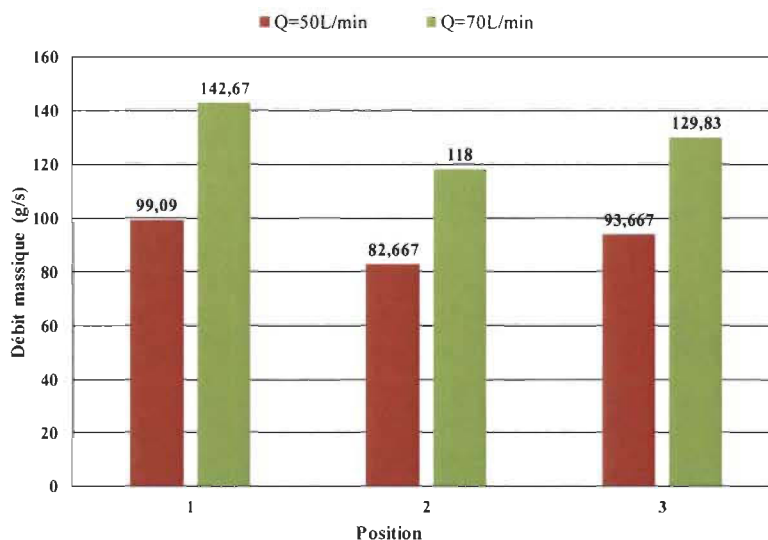


Figure 4.36 Débit massique de la suspension L-MNFC 0.5% à la sortie de l'Hydra-Sizer™

Comme le montre la Figure 4.36, pour les débits 50 L/min et 70 L/min, les débits massiques aux positions 1 et 3 sont presque identiques, tandis qu'ils sont légèrement inférieurs à la position 2. En comparaison avec le test de rentabilité de l'eau dans la Figure 4.33, l'uniformité de la suspension L-MNFC est préférable pour assurer un rideau stable le long de la même sortie de l'Hydra-Sizer™. Il est démontré que les ajustements de l'ouverture de la buse avant les tests hors ligne des suspensions L-MNFC ont été efficaces. Lorsque le débit augmente de 50 à 70 L/min, le débit massique de chaque position augmente proportionnellement.

- **L-MNFC 0.5% + CMC 6%**

Comme indiqué précédemment concernant les effets de dispersion de CMC sur la MNFC, l'addition de CMC à 4-6% est supposée fournir des effets de dispersion optimaux. Par conséquent, la suspension L-MNFC 0.5% + CMC 6% est utilisée pour effectuer un essai d'évaluation de la performance des suspensions de L-MNFC avec CMC dans un couchage rideau. La Figure 4.37 présente le rideau de la L-MNFC 0.5% + CMC 6% à 50 L/min et 70 L/min. À différents débits, le rideau reste stable pendant plusieurs dizaines de secondes et les flocs qui pourraient être formés dans l'Hydra-Sizer™ sont rapidement évacués par l'écoulement. Pour l'instant, en l'absence d'une évaluation autre que l'observation oculaire, la stabilité au rideau de L-MNFC 0.5% + CMC 6% apparaît presque identique à celle de L-MNFC 0.5%: aucune différence ne peut être observée à l'œil nu.

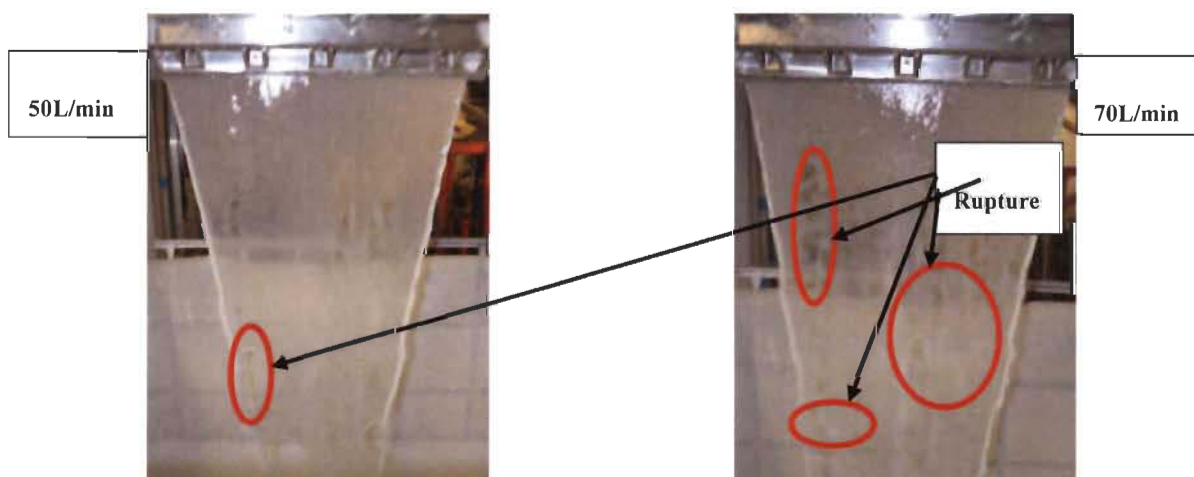


Figure 4.37 Écoulement rideau pour la suspension L-MNFC 0.5% + CMC 6% (à 50 L/min de débit (à gauche) et à 70 L/min de débit (à droite))

Pour évaluer l'uniformité de l'écoulement, le débit massique des trois positions le long de la sortie d'Hydra-Sizer™ est présenté à la Figure 4.38.

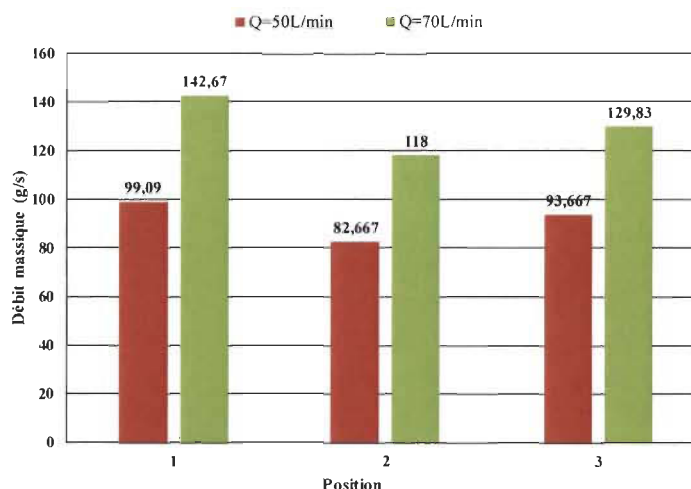


Figure 4.38 Débit massique de la suspension L-MNFC 0.5% + CMC 6% le long de la sortie de Hydra-Sizer™

Comme pour la L-MNFC 0.5%, les débits massiques des positions 1 et 3 restent presque au même niveau et diminuent légèrement à la position 2. En augmentant le débit de 50 à 70L/min, le débit massique de chaque position augmente proportionnellement.

4.5.3 Discussion sur la performance de la MNFC dans l'Hydra-Sizer™

Comme observé, dans l'Hydra-Sizer™, L-MNFC 0.5% ne présente pas un rideau qui stable. La suspension L-MNFC 0.5% + CMC 6% est plus au moins stable (mais il ne reste pas stable au fil du temps=stabilité pour quelques dizaines de secondes). L'application de la MNFC en couchage rideau est possible mais elle n'est pas parfaite. En comparant les deux rideaux, il n'y a pas de grande différence de performance entre la suspension L-MNFC 0.5% et la suspension L-MNFC 0.5% + CMC 6% qui est détectée à l'œil nu. Nous pouvons en conclure que l'amélioration du niveau de la dispersion de la suspension L-MNFC nécessiterait une analyse plus précise de la qualité du débit (comme une analyse précise des photos du rideau, par exemple). Cela signifie également que la concentration optimale de CMC nécessaire doit être confirmée par l'amélioration des propriétés mécaniques et de barrière du papier couché avec la MNFC, au moyen d'essais en ligne sur la machine à papier. Il convient enfin de noter que des essais en ligne à l'échelle pilote

avec de la MNFC et de la CMC ont été réalisés (et d'autres essais à l'échelle pilote doivent encore être réalisés) sur machine à papier d'Innofibre, le protocole et les résultats de ces essais sont présentés dans la section suivante.

4.6 Résultats des essais en ligne d'HydraSizer™

4.6.1 Performance de la première série des essais

Le premier jour d'essai a été consacré au réglage de la machine à papier. Le deuxième jour, le démarrage a été facile et la machine à papier tournait à 200 m/min pendant 10 minutes. Les différentes positions de l'HydraSizer™ sur la machine à papier sont présentées sur la Figure 3.17 (cité dans la partie des méthodes).

- **Essais 1 et 2 (0.5% L-MNFC, position A)**

La solution à 0.5% de L-MNFC a été couchée à 50 et 70 L/min. À 50 L/min, le rideau semblait homogène, comme on peut le voir à la Figure 4.39. À 70 L/min, le rideau semblait également homogène. À ce réglage, un important reflux est apparu à l'arrière du rideau avec des éclaboussures continues sur le fil (voir Figure 4.40). Néanmoins, la machine fonctionne bien et aucun problème n'apparaît en aval. Au cours de ces essais, des bouchons ont été observés dans les lèvres de l'HS™.

L'outil manuel utilisé pour retirer les flocs est efficace, mais la manipulation est délicate au-dessus de la bande de papier. Le point le plus important est qu'aucune rupture de bande n'a été constatée et que le papier structuré passe normalement à travers la presse, les sections de séchage et d'enroulement.

Malheureusement, un problème mécanique est survenu dans le système de bobinage et les essais ont dû être arrêtés. La section suivante présente la performance de la deuxième série des essais HydraSizer™ en ligne sur la machine à papier.

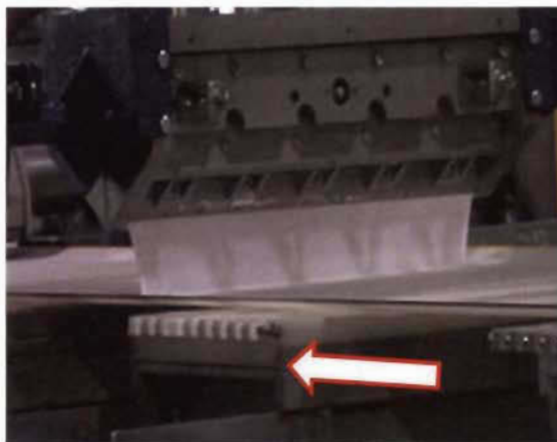


Figure 4.39 Rideau 0.5% L-MNFC à 50 L/min (la flèche indique le sens de la machine à papier)

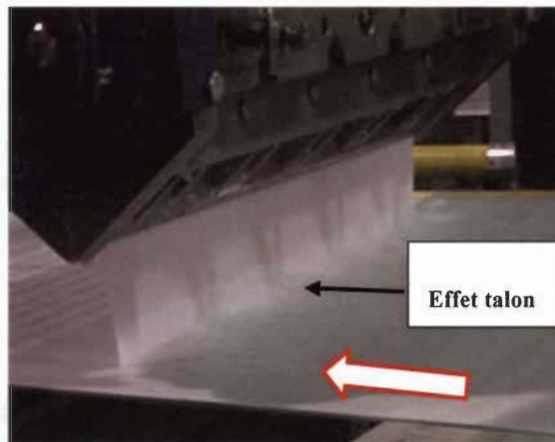


Figure 4.40 Rideau 0.5% L-MNFC à 70 L/min (la flèche indique le sens de la machine à papier)

4.6.2 Performance de la deuxième série des essais

- **Ajustement de l'Hydra-Sizer™**

Pour éviter le reflux à 70 L/min, un premier test a été effectué en utilisant uniquement de l'eau. L'appareil a été incliné jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de reflux sur le fil (voir Figure 4.41 et Figure 4.42). Les meilleurs résultats ont été obtenus pour un angle de 41°. Ce paramètre sera conservé pour chaque essai à 70 L/min.



Figure 4.41 Image de face du flux incliné



Figure 4.42 Image arrière du flux incliné

- **Position A**

Essais 3 et 4 (0.5% L-MNFC + 6% CMC)

À 50 L/min, la position de l'HydraSizer™ est verticale (voir Figure 4.43), le même comportement a été observé que dans le premier essai sans CMC. À 70 L/min, le rideau était instable : Deux bouchons (ils sont généralement dû au flocs L-MNFC) sont apparus au cours de l'essai (voir Figure 4.44), mais la largeur du rideau central était suffisante pour recouvrir la bande du papier (essai 4: avec un angle d'inclinaison de 41°: l'effet de l'angle n'est pas étudié dans ce travail mais il est bien mentionné avant que l'effet du talon disparaisse avec l'inclinaison).



Figure 4.43 Rideau L-MNFC+CMC en position A à 50L/min

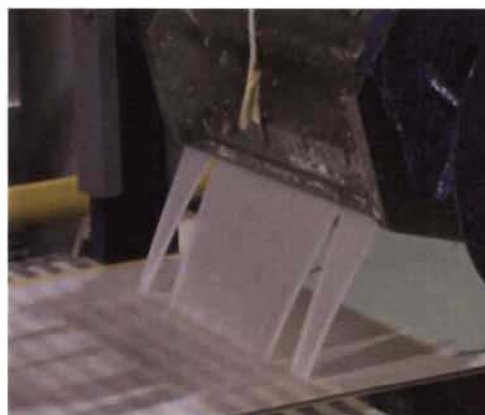


Figure 4.44 Rideau L-MNFC+ CMC en position A à 70L/min

- **Position B**

L'HydraSizer™ est placé après le top former (Figure 4.45).



Figure 4.45 HydraSizer™ en position B

Essais 5 et 6 (0.5%L-MNFC)

Même comportement que précédemment, à 50 L/min, aucun bouchon n'a été observé dans le rideau (Figure 4.46). À 70 L/min, un bouchon persistant est apparu au milieu du rideau (Figure 4.47). En conséquence, la région centrale de la feuille de papier pour le numéro d'essai 6 doit être évitée.



Figure 4.46 Rideau 0.5 % L-MNFC en position B à 50L/min



Figure 4.47 Rideau 0.5 % L-MNFC en position B à 70L/min

Essais 7 et 8 (0.5% de L-MNFC + 6% de CMC)

Une bonne stabilité du rideau a été observée, mais une rupture est apparue au fil du temps (Figure 4.48 et Figure 4.49) aux bords du rideau.



Figure 4.48 Rideau L-MNFC+CMC en position B à 50L/min



Figure 4.49 Rideau L-MNFC+CMC en position B à 70L/min

- **Position C**

L'HydraSizer™ a été positionné avant le top former (Figure 4.50). Les essais à cette position sont faits avant la ligne d'eau pour favoriser la rétention de la L-MNFC.

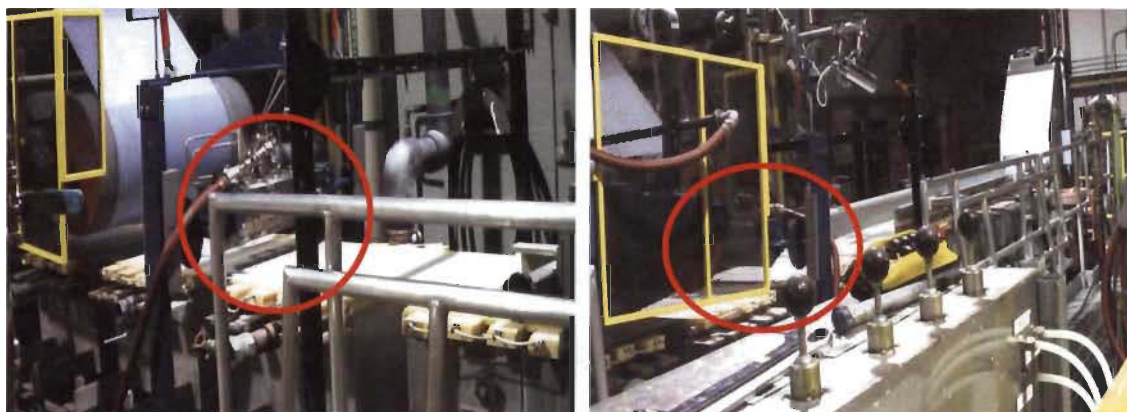


Figure 4.50 L'HydraSizer™ en position C

Un essai a été effectué à 50 L/min avec 0.5% de L-MNFC. Pour cette position, le rideau provoque de grandes perturbations sur la toile en fibres dans la section presse. Ainsi, les essais numéros 9 à 12 ne peuvent pas être réalisés.

- **Conclusion sur la performance de l'HydraSizer™**

À partir de ces différents essais, l'application de l'HydraSizer™ s'est bien déroulée après le top-former. Les deux débits massiques peuvent être utilisés, mais une inclinaison est préférable à haute vitesse pour éviter le reflux. Les ruptures du rideau apparaissent le long de l'ouverture de la buse.

Les bouchons de fibres apparaissant de manière aléatoire peuvent être évités en augmentant l'ouverture de l'espace. Après la fabrication, les échantillons de papier ont été roulés et laissés dans une pièce à atmosphère contrôlée (23 °C, 50% HR) pour les stabiliser pendant une semaine. Ensuite, les différents papiers subissent une caractérisation mécanique et barrière pour valoriser l'ajout de la L-MNFC.

Chapitre 5 - Conclusion

Ce travail visait à accroître la connaissance fondamentale des paramètres clés régissant le procédé du couchage rideau en caractérisant l'écoulement interne dans l'HydraSizer™ et l'écoulement externe des suspensions L-MNFC. L'objectif principal était d'aider à comprendre les principaux critères d'une application réussie du rideau L-MNFC ou (L-MNFC+ additifs) et de permettre ensuite de développer des saucés de couchage à base de la L-MNFC adaptées à l'utilisation de l'HydraSizer™.

Le premier chapitre est consacré à une introduction générale du projet de thèse. Le deuxième chapitre est une revue de littérature qui présente un aperçu sur la L-MNFC (méthodes de préparation et propriétés) et sur le procédé du couchage rideau (physique, et paramètres). De plus, un état d'art sur l'écoulement interne et externe du rideau est présenté. Il a été constaté que certaines études de l'écoulement interne étaient simplifiées en fonction de la complexité de la géométrie des cavités des filières du couchage rideau. C'est pour cette raison, dans cette thèse, nous avons proposé de développer une étude avec les conditions de fonctionnement utilisées pour le couchage rideau dans l'industrie du papier pour la L-MNFC.

Le troisième chapitre est le chapitre matériels et méthodes : il représente les suspensions L-MNFC utilisées et leur composition en CMC (épaississant et modificateur de viscosité) et en tensioactif (modificateur de la tension de surface) et les différents équipements pour réaliser nos mesures nécessaires. Il présente également les méthodes expérimentales, numériques et analytiques utilisés durant ce projet de thèse. Neufs suspensions L-MNFC sont utilisées pour le couchage rideau avec l'HydraSizer™ (équipement fournie par GL&V).

Ensuite, le protocole expérimental a été décrit; Il s'agit de l'étude rhéologique et physique (tension de surface) pour évaluer l'effet des additifs (CMC et tensioactif NIAPROOF) sur la dispersion de la L-MNFC (spécialement pour la CMC), sur la viscosité et sur la tension de surface de suspensions L-MNFC. En liaison avec le couchage rideau, une étude

analytique est développée pour analyser l'effet des additifs sur la stabilité du rideau (au niveau de la fente de l'HydraSizer™).

Nous avons lié la stabilité du rideau au niveau de la fente avec la nature de l'écoulement interne (dans la cavité de l'HydraSizer™) et aussi avec la compatibilité du design de l'HydraSizer™ pour ce type de procédé. Pour se faire, une analyse basée sur la simulation CFD est proposée afin de visualiser l'écoulement interne des suspensions L-MNFC. Une étude analytique est aussi proposée pour interpréter quelques résultats de la simulation CFD.

L'optimisation de l'écoulement L-MNFC dans l'HydraSizer™ n'est parfaite que si nous décrivons l'écoulement rideau dans toutes les zones. Après l'écoulement interne, nous passons à l'analyse de l'écoulement externe qui est basée sur la détermination des paramètres pertinents (paramètres d'étirement ou d'extension du rideau) et dont l'objectif est de trouver une fenêtre opérationnelle pour un couchage rideau réussi. Enfin, des essais HydraSizer™ sont effectués même si la géométrie pourrait causer un problème mais comme nous n'avons pas eu de contrôle lors de sa fabrication, nous devons procéder avec l'appareil tel quel. Des essais de caractérisation du papier structuré sont faites afin de valoriser l'ajout de la L-MNFC.

Nous avons d'abord constaté qu'il était possible d'améliorer les dispersions de la L-MNFC en ajoutant de faibles concentrations de CMC. La CMC aide à disperser la L-MNFC en diminuant la taille d'agglomération des fibrilles. L'ajout du tensioactif favorise la diminution de la tension de surface des suspensions L-MNFC. L'étude rhéologique a révélé un comportement rhéofluidifiant de toutes les suspensions (viscosité qui diminue avec le taux de cisaillement) mais nous avons remarqué une augmentation de la teneur en air dans les suspensions L-MNFC qui peut causer des problèmes de couchage et diminuer la qualité du papier structuré.

Nous avons mesuré expérimentalement le débit minimal pour la formation du rideau pour les suspensions L-MNFC avec CMC (suspensions M-CMC) et avons constaté que le débit minimal augmentait légèrement avec la diminution de la viscosité et avec une légère augmentation de la tension de surface et de la densité des suspensions M-CMC. Cela veut

dire que la stabilité du rideau des suspensions M-CMC diminue légèrement avec la diminution de la viscosité (diminution de la résistance à la rupture) et l'augmentation de la tension de surface de surface (augmentation de la rupture du rideau) ce qui est cohérent avec la théorie. De plus, l'effet du tensioactif et l'effet combiné (CMC et tensioactif) sur le débit minimal a été étudié. La stabilité augmente avec l'augmentation de la teneur en tensioactif (pour les suspensions M-NIA) et avec l'augmentation de la CMC et de NIAPROOF (pour les suspensions M-CMC-NIA). Pour établir la relation stabilité du rideau-uniformité de l'écoulement, nous avons simulé l'écoulement des suspensions L-MNFC et étudié l'impact des propriétés rhéologiques et physiques (viscosité et tension de surface) et des conditions opératoires (débit) dans la cavité de l'HydraSizerTM. Nous avons montré que pour les suspensions M-CMC, la diminution de la viscosité et l'augmentation légère de la tension de surface (augmentation de la teneur en CMC) augmente la taille de la perturbation (taille du tourbillon). D'un autre côté, pour les suspensions M-NIA, la taille de la perturbation observée au niveau de la suspension L-MNFC0,5% diminue avec l'augmentation de la teneur en NIAPROOF (diminution de la tension de surface et diminution légère de la viscosité). L'effet combiné de la CMC et du tensioactif conduit à la diminution du tourbillon et à sa disparition pour 6% en CMC et 0,05% du NIAPROOF. L'effet du débit est bien clair pour les suspensions M-CMC : l'augmentation du débit augmente clairement la taille du tourbillon et donc la perturbation de l'écoulement. Pour les suspensions M-NIA et les suspensions M-CMC-NIA le débit n'a pas d'effet significatif sur l'écoulement.

Les résultats de l'étude analytique ont montré que l'indice d'uniformité diminue en fonction du nombre visqueux N_v (nombre adimensionnel), cela veut dire qu'on augmentant le nombre de Reynolds l'uniformité de l'écoulement diminue ce qui a confirmé les résultats de la CFD. En outre, nous n'avons observé aucune évolution claire de l'uniformité en fonction de l'indice de la loi de puissance (teneur en CMC et NIAPROOF). La pression augmente en fonction du nombre visqueux pour toute les suspensions L-MNFC ce qui a expliqué que la diminution de l'uniformité est due à la pression élevée à l'entrée de l'HydraSizerTM. De ce fait, nous avons montré que le design de l'HydraSizerTM et spécialement au niveau de l'entrée n'est pas parfaitement convenable à l'application de la L-MNFC par couchage rideau.

L'analyse de l'écoulement externe a montré que l'épaisseur du rideau L-MNFC dans la zone d'impact augmente en fonction du débit de fonctionnement. Nous avons constaté également que l'épaisseur du rideau augmente en fonction des additifs. Les suspensions M-CMC-NIA offre l'épaisseur du rideau le plus élevé. La CMC offre une épaisseur plus que le tensioactif et nous avons conclu que la CMC et le tensioactif offre un écoulement interne uniforme, une stabilité du rideau et une épaisseur élevée au niveau de la zone d'impact. En outre, le calcul des facteurs d'étirement et du taux d'étirement du rideau en fonction des conditions de fonctionnement de l'HydraSizerTM permet de déterminer les limites de la fenêtre opérationnelle de l'HydraSizerTM en utilisant les suspensions L-MNFC comme rideau.

Les essais de faisabilité ont montré que l'application de l'HydraSizerTM s'est bien déroulée après le top-former. Les deux débits massiques peuvent être utilisés, mais une inclinaison est préférable à haute vitesse pour éviter le reflux. Les ruptures du rideau ont apparu le long de l'ouverture de la buse.

Tous ces résultats ont permis d'accroître les connaissances fondamentales sur les paramètres clés régissant le procédé de couchage rideau en utilisant la L-MNFC et l'HydraSizerTM, elles pourraient être appliqués industriellement pour réduire les défauts sur le papier final. Nous avons d'abord caractérisé les suspensions L-MNFC, étudié leurs écoulement interne et externe. Plusieurs phénomènes ont été observés grâce à la CFD et au travail expérimental réalisé avec l'HydraSizerTM. Enfin, ce travail peut être poursuivi en simulant l'écoulement sur le rideau lui-même et sur la zone d'impact qui n'a pas encore été réalisé. Les validations expérimentales sur le rideau peuvent être effectuées en utilisant la technique 3D PIV, technique utilisée pour visualiser l'écoulement rideau expérimentalement.

Publications, présentations et posters

Revue à comité de lecture

- Abdelaâdim Tibouda, Benoit Delcroix, Éric Loranger, and Patrice Mangin “Effect of CMC and Surfactant on the Physical Properties of Micro Nanofibrillated Cellulose Coating Colors.” Modern Environmental Science and Engineering (ISSN 2333-2581), January 2019, Volume 5, No. 1, pp.1-8, Doi: 10.15341/mese (2333-2581) /01.05.2019/001, Academic Star Publishing Company, 2019, www.academicstar.us
- Abdelaâdim Tibouda, Benoit Delcroix, Éric Loranger, and Patrice Mangin “Effect of Physical Properties of L-MNFC Suspensions on Curtain Stability” Modern Environmental Science and Engineering (ISSN 2333-2581)

Affiches

1. 2014 PaperWeek Canada, 3-6 Feb 2014, Montréal, Québec, Canada.
« Measuring the Dispersion of Micro-Nano-Fibrillated-Cellulose (MNFC) with Carboxy Methyl Cellulose (CMC) »
2. 1st FIBER Network Conference, 13-16 May 2013, Cornwall, Ontario, Canada.
« Inclusion of Micro-Nano-Fibrillated-Cellulose (MNFC) in papermaking with a Hydra-Sizer™: the HS study 2 »
3. 2013 PaperWeek Canada, 4-7 Feb 2014, Montréal, Québec, Canada
« Inclusion of Micro-Nano-Fibrillated-Cellulose (MNFC) in papermaking with a Hydra-Sizer™: the HS study 1 »

Bibliographie

1. Canada, R.N., Cahier d'information sur la forêt 2018. p. 14-20.
2. Harinath, E., L. Biegler, and G.A. Dumont, Control and optimization strategies for thermo-mechanical pulping processes: Nonlinear model predictive control. *Journal of Process Control*, 2011. 21(4): p. 519-528.
3. Lavoine, N., et al., Microfibrillated cellulose—Its barrier properties and applications in cellulosic materials: A review. *Carbohydrate polymers*, 2012. 90(2): p. 735-764.
4. Turbak, A.F.S., F W; Sandberg, K R, Microfibrillated cellulose, a new cellulose product: properties, uses, and commercial potential. *J. Appl. Polym. Sci.: Appl. Polym. Symp.*, 1983. 37: p. 4-6.
5. Herrick, F.W.C., R L; Hamilton, J K; Sandberg, K R, Microfibrillated cellulose: morphology and accessibility, in *J. Appl. Polym. Sci.: Appl. Polym. Symp.* 1983. p. 2-3.
6. Iwamoto, S., A. Nakagaito, and H. Yano, Nano-fibrillation of pulp fibers for the processing of transparent nanocomposites. *Applied Physics A*, 2007. 89(2): p. 461-466.
7. Siró, I. and D. Plackett, Microfibrillated cellulose and new nanocomposite materials: a review. *Cellulose*, 2010. 17(3): p. 459-494.
8. Pääkkö, M., et al., Enzymatic hydrolysis combined with mechanical shearing and high-pressure homogenization for nanoscale cellulose fibrils and strong gels. *Biomacromolecules*, 2007. 8(6): p. 1934-1941.
9. Saito, T.a.A.I., Isogai, Introduction of aldehyde groups on surfaces of native cellulose fibers by TEMPO-mediated oxidation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2006. 289(1-3): p. 219-225.
10. Saito, T.a.A.I., Ion-exchange behavior of carboxylate groups in fibrous cellulose oxidized by the TEMPO-mediated system. *Carbohydrate Polymers*, 2005. 61(2): p. 183-190.
11. Nakagaito, A. and H. Yano, The effect of morphological changes from pulp fiber towards nano-scale fibrillated cellulose on the mechanical properties of high-strength plant fiber based composites. *Applied Physics A*, 2004. 78(4): p. 547-552.
12. Nakagaito, A.N. and H. Yano, Novel high-strength biocomposites based on microfibrillated cellulose having nano-order-unit web-like network structure. *Applied Physics A*, 2005. 80(1): p. 155-159.






13. Kristin Syverud, P.S., Strength and barrier properties of MFC films. *Cellulose*, 2008. 16 (1): p. 2-4.
14. Galina Rodionova, M.L., Oyvind Eriksen & Oyvind Gregersen Surface chemical modification of microfibrillated cellulose: improvement of barrier properties for packaging applications. *Cellulose* 2010. 18(1)(February 2011): p. 127-134.
15. T. Saito, S.K., Y. Nishiyama, et A. Isogai, , « Cellulose Nanofibers Prepared by TEMPO-Mediated Oxidation of Native Cellulose », *Biomacromolecules*,. vol. 8, no 8,: p. p.2485-2491.
16. Iotti, M., et al., Rheological studies of microfibrillar cellulose water dispersions. *Journal of Polymers and the Environment*, 2011. 19(1): p. 137-145.
17. Xu, X., Etude des relations entre la dispersion de la micro-nanocellulose fi brillée (MNFC) et son aptitude au couchage rideau 2014. p. 12-14.
18. Gardner, D.J., et al., Adhesion and surface issues in cellulose and nanocellulose. *Journal of adhesion science and technology*, 2008. 22(5-6): p. 545-567.
19. Ahola, S., et al., Effect of polymer adsorption on cellulose nanofibril water binding capacity and aggregation. *BioResources*, 2008. 3(4): p. 1315-1328.
20. Vesterinen, A.H., et al., The effect of water-soluble polymers on rheology of microfibrillar cellulose suspension and dynamic mechanical properties of paper sheet. *Journal of applied polymer science*, 2010. 116(5): p. 2990-2997.
21. Tietz, M., Endres, Isabel, Blade, film and curtain coating techniques and their influence on paper surface characteristics. *Chemical Engineering*, 2007 6(11): p. 24-32.
22. Ruschak, S.J.W.a.K.J., *Coating Flows*. Fluid Mechanics, 2004. 36(1): p. 29-53.
23. Triantafillopoulos, N.G., Johan ; Luostarinen, Iiro3 ; Paloviita, Petri, Operational issues in high-speed curtain coating of paper, Part 2: Curtain coating of lightweight coated paper. *Polymers, paint and wood industries*, 2004. 3(12): p. 11-16.
24. Y. D. Shikhmurzaev, « Dynamic contact angles and flow in vicinity of moving contact line ». *AIChE Journal*, . vol. 42, no 3,: p. p. 601–612, .
25. T. D. Blake, A.C., et K. J. Ruschak, , «Hydrodynamic assist of dynamic wetting». *AIChE J.*, . vol. 40, no 2, : p. p. 229-242, .
26. Tripathi, P., et al., A statistical study of process variables to optimize a high speed curtain coater—Part I. *Tappi Journal*, 2009. 8(1): p. 20-26.
27. Tripathi, P., Stabilization of Curtain Coater at High Speeds. 2005.

28. N. Triantafillopoulos, J.G., I. Luostarinen, et P. Paloviita, , « Operational issues in high-speed curtain coating of paper, Part 2: Curtain coating of lightweight coated paper ». Tappi journal, . vol. 3, no 12, : p. p. 11-16.
29. Sugihara, M., et al. Control of dynamic wetting line and entrainment of boundary air in high-speed curtain coating. in Coating Conference Proceedings, May, TAPPI Press, Atlanta, GA. 2002.
30. Brown, D., A study of the behaviour of a thin sheet of moving liquid. Journal of fluid mechanics, 1961. 10(2): p. 297-305.
31. Kistler, S.F., The fluid mechanics of curtain coating and related viscous free surface flows with contact lines. 1985.
32. Clarke, A., Recirculating flows in curtain coating, in The Mechanics of Thin Film Coatings. 1996, World Scientific. p. 32-41.
33. E.-H. Choi, C.-H.K., et H.-L. Lee, , « Effects of PVA and CMC addition on Rheological Characteristics and Curtain Stability of GCC Based Curtain Coating Colors ». Journal of Korea Technical Association of The Pulp and Paper Industry,. vol.42, no 5, : p. p. 74-82, .
34. M. J. Peeyush Tripathi, « A Study for the Statistical Optimization of a High Speed Curtain Coater ». 2006.
35. T. Peeyush, J.M., et L. Do Ik, , « A Study for the Statistical Optimization of a High Speed Curtain Coater ».
36. Guyon, E., Luc Petit, and Jean-Pierre Hulin., Hydrodynamique physique. 1991, Paris 506.
37. P. Martinez, «Etude expérimentale et simulation d'écoulements de fluides modèles et de dispersions pigmentaires dans une coucheuse rideau». 2011.
38. T.-J. Liu et C.-N. Hong, Liquid Film Coating «Scientific principles and their technological implications».
39. K. Miyamoto et Y. Katagiri, « Curtain Coating », . Liquid Film Coating,, 1997: p. p. 463-494.
40. Lee, K.Y., S.H. Wen, and T.J. Liu, Vortex formation in a dual-cavity coat-hanger die. Polymer Engineering & Science, 1990. 30(19): p. 1220-1227.
41. Vrahopoulou, E., A model for fluid flow in dies. Chemical engineering science, 1991. 46(2): p. 629-636.
42. Y.-H. Chang, S.-H.W., et T.-J. Liu, , « Experimental observation on entrance flow inside extrusion dies ». Polym Eng Sci,. vol. 36, no 21, : p. p. 2663-2675.

43. S.-H. Wen, T.-J.L., et J.-D. Tsou, , « Three-dimensional finite element analysis of polymeric fluid flow in an extrusion die. Part I: Entrance effect », Polym Eng Sci., vol.34, no 10,: p. p. 827-834.
44. Trouton, F.T., On the coefficient of viscous traction and its relation to that of viscosity. Proc. R. Soc. Lond. A, 1906. 77(519): p. 426-440.
45. R. J. Dyson, P.D.H., C. J. W. Breward, P. Herdman, et J. Brander,. « Mathematical modelling of curtain coating », . in Proceedings of the 6th European Coating Symposium,. 2005.
46. Lin, S., Stability of a viscous liquid curtain. Journal of Fluid Mechanics, 1981. 104: p. 111-118.
47. Wilhelmy, L., Ueber die Abhängigkeit der Capillaritäts-Constanten des Alkohols von Substanz und Gestalt des benetzten festen Körpers. Annalen der Physik, 1863. 195(6): p. 177-217.
48. Mysels, K.J., Some limitations in the interpretation of the time dependence of surface tension measured by the maximum bubble pressure method. Langmuir, 1989. 5(2): p. 442-447.
49. Garrett, P.R. and D.R. Ward, A reexamination of the measurement of dynamic surface tensions using the maximum bubble pressure method. Journal of Colloid and Interface Science, 1989. 132(2): p. 475-490.

Il existe six formes de géométrie différentes comme indiqué dans la Table 1. Le choix de la géométrie est fonction du liquide qu'il faut analyser.

Table 1 Les différentes géométries du rhéomètre Stresstech

Nom	Photos : Tête de lecture + Support	Caractéristiques
CC25		<ul style="list-style-type: none"> •Utilisé pour les suspensions très peu visqueuses.
Double Gap		<ul style="list-style-type: none"> •Utilisé généralement pour l'eau
C40 / 4° et C20 / 2°		<ul style="list-style-type: none"> •La différence entre les deux têtes de mesure est le diamètre de la tête de lecture. •Les têtes sont coniques d'un angle de 4° ou 2°.
P40 et P20		<ul style="list-style-type: none"> •La différence entre les deux têtes de mesure est le diamètre de la tête de lecture. •Ce sont des têtes plates, habituellement utilisé pour des suspensions contenant des particules.
Vane TOOL		<ul style="list-style-type: none"> •Habituellement utilisé pour des liquides très visqueux.

certaines plages d'application (Cf. Table 2). Il est évident que le tableau ne constitue pas une vérité absolue, mais il donne de bonnes indications.

Table 2 Caractéristiques et plage d'utilisation des têtes de lecture

Tête	Contrainte de cisaillement (Pa)		Taux de cisaillement (s^{-1})		Viscosité (Pa. s)		Volume Echantillon (ml)
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	
CC25	0,0125	1250	$6,4 \cdot 10^{-6}$	409	3,1	1953	15,9
Double Gap	$1,9 \cdot 10^{-3}$	191	$1,2 \cdot 10^{-5}$	775	0,2	158	24,3
C20 / 2°	0,239	23875	$2,9 \cdot 10^{-5}$	1834	13,0	8241	0,1
C40 / 4°	0,0298	2984	$1,4 \cdot 10^{-5}$	916	3,3	2129	1,2
P 20	0,239	23875	$3,7 \cdot 10^{-6}$	240	99,5	64595	0,1
P 40	0,0298	2984	$7,5 \cdot 10^{-6}$	480	6,2	3973	1,3
Vane Tool	0,0208	2076	$1,2 \cdot 10^{-6}$	76,3	27,2	17333	15,9